В ДЛЯ ВУЗОВ

СБОРОЧНЫЕ, МОНТАЖНЫЕ И ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Под редакцией проф. В.А.Барвинка

Рекомендовано Министерством общего и профессионального образования Российской Федерации в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Авиа- и ракетостроение" и специальности "Самолето- и вертолетостроение"

Самарский Государственный аэрокосмический университет
№ 638170
Научно-техническая библиотека

МОСКВА
"МАШИНОСТРОЕНИЕ"
1996

ББК 34.68
С23
УДК 629.7.018.002.72(075)

Авторы: В.А.Барвинок, В.И.Богданович, П.А.Бордаков, Б.П.Пешков, И.Н.Желтов, И.А.Докукина

Рецензенты: кафедра технологии ракетно-космического машиностроения МГТУ им.Баумана и проф., д-р техн.наук В.Н.Крысин

С23 **Сборочные**, монтажные и испытательные процессы в производстве летательных аппаратов: Учебник для студентов высших технических учебных заведений/ В.А.Барвинок, В.И.Богданович, П.А.Бордаков, Б.П.Пешков, И.Н.Желтов, И.А.Докукина. Под ред. проф.В.А.Барвинка.- М.: Машиностроение, 1996.- 576 с.: ил.

ISBN 5-217-02863-7

Рассмотрены характеристики и особенности сборочных, монтажных и испытательных процессов в производстве летательных аппаратов. Бóльшое внимание уделено сборочно-сварочным работам, методам их контроля и применению, а также балансировке, контролю геометрических параметров, методам испытания на герметичность летательных аппаратов и их систем. Особое внимание уделено работам на ЛИСе и КИСе и технологическом комплексе, вопросам теории надежности и технологического обеспечения.

$С\frac{2704090000-052}{038(01)-96}$ Без объявл.

ББК 34.68

ISBN 5-217-02863-7

© В.А.Барвинок, В.И.Богданович, П.А.Бордаков и др., 1996

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность эксплуатации любого летательного аппарата в значительной мере определяется содержанием и качеством технологических процессов их сборки, монтажа и испытаний.

Эти процессы для ракетно-космической и авиационной техники имеют много сходства, но в то же время обладают рядом существенных различий, обусловленных спецификой конструкции, назначением и заданным ресурсом. Поэтому в учебнике рассматриваются общие вопросы производства летательных аппаратов, и акцентируется внимание на отличительных особенностях.

Основные главы книги содержат информацию о современных технологических процессах и включают в себя последние достижения в каждой конкретной области, а также перспективы развития способов выполнения сварочных, сборочных и испытательных операций, применения средств механизации и автоматизации.

Учебник написан в соответствии с программами курсов "Технология сборочных процессов", "Технология сборочно-сварочных работ", "Технология монтажно-испытательных процессов" и "Технологические методы обеспечения надежности" для студентов технологической и конструкторской специализации.

В учебнике содержится большое количество примеров, базирующихся на технологических решениях, применяемых предприятиями аэрокосмического комплекса. В нем изложен ряд технологических процессов, связанных с соединением композиционных материалов, сварочно-сборочными процессами, нанесением покрытий и т.д., разработанных и внедренных авторами на предприятиях авиакосмической промышленности.

В связи с ростом требований к сертификации продукции большое внимание в учебнике нашли вопросы теории надежности

технических систем и технологического обеспечения качества летательных аппаратов при изготовлении и испытаниях.

Учебник представляет собой коллективный труд преподавателей кафедры производства летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета им.С.П.Королева: В.А.Барвинка, В.И.Богдановича, П.А.Бордакова, Б.П.Пешкова, И.Н.Желтова и И.А.Докукиной, много лет читающих лекции и ведущих практические занятия по специальностям самолеты-вертолеты, ракеты-носители и космические летательные аппараты.

Авторы считают своим долгом выразить искреннюю признательность доцентам кафедры А.С.Горячеву и Л.А.Дударю за предоставленную возможность использования их учебно-методического материала в некоторых разделах учебника, а также выразить благодарность сотрудникам кафедры Б.А.Бакирову, Л.С.Тарасовой, И.М.Асмоловой и Л.В.Знаменской за техническую помощь, оказанную в оформлении учебника.

Авторы приносят также искреннюю благодарность профессору, д-ру техн.наук В.Н.Крысину и коллективу кафедры "Технология ракетно-космического машиностроения" Московского государственного технического университета за большую работу по рецензированию рукописи, за ряд ценных советов и замечаний, учтенных в её окончательной редакции.

Авторы с большой благодарностью примут все критические замечания по содержанию книги и методике её изложения, которые помогут оказать содействие в дальнейшей работе над усовершенствованием учебника.

1. ЗНАЧЕНИЕ, ХАРАКТЕРИСТИКА И ОСОБЕННОСТИ СБОРОЧНЫХ, МОНТАЖНЫХ И ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

1.1. Особенности производства летательных аппаратов

Особенности производства летательных аппаратов (ЛА) во-первых определяются особенностями их конструкции, во-вторых, специфическим характером их производства. Эти особенности заключаются в следующем.

1. Современные ЛА эксплуатируются при высоких температурах в камере сгорания и на поверхности головных частей и спускаемых аппаратов, высоких давлениях, высоких скоростях истечения горячих газов из камер сгорания часто оказывают сильное эрозионное воздействие на стенки корпуса и детали двигательных установок. Работа деталей, узлов и агрегатов ЛА в среде агрессивных жидкостей (топлива) вызывает необходимость применения новых материалов со специальными свойствами, что создает дополнительные трудности в производстве при их обработке и сборке деталей в узлы и агрегаты.
2. Другой особенностью современных ЛА является необычайная сложность и многодетальность, например, число деталей для средних ЛА доходит до 10 тыс. наименований.
3. Характерной особенностью также является большая разнотипность агрегатов, узлов, аппаратуры, приборов, производство и сборку которых на одном предприятии было бы невозможно осуществить технически и организационно, поэтому при производстве ЛА широкое применяется кооперирование. Это предопределяет наличие головного предприятия, на котором обычно изготавливается корпус ЛА, производятся агрегатная и общая сборки, испытания и сдача готового изделия. На головном предприятии должно происходить определение всех размеров, их увязка (разбивка теоретического плаза), хранение и выдача всей документации на производство деталей и узлов кооперирующимся предприятиям-поставщикам.
4. Уменьшение массы ЛА является важнейшей проблемой, что во многих случаях обуславливает применение листовых элементов, обладающих сложной формой, а это в условиях широкой кооперации в свою очередь обуславливает совершенно отличное от других производств решение вопросов точности и

взаимозаменяемости путем применения особого метода производства, называемого плазово-шаблонным методом.

5. Сложность пространственных форм и малая жесткость большинства деталей ЛА (обшивка, стрингеры, пояса и стенки шпангоутов, нервюры и др.). В связи с этим возникают трудности точного выполнения размеров и обеспечения взаимозаменяемости как деталей, так и собираемых из них узлов, панелей и агрегатов. Этими особенностями обусловлено применение в производстве ЛА многочисленных сборочных, монтажных и других специальных приспособлений, технологических способов обеспечения взаимозаменяемости сборочных единиц.
6. Применение при сборке ЛА различных соединений заклепочных, болтовых, сварных, клеевых, клеесварных, паяных. Кроме того, необходимо получение герметичных соединений болтовых, заклепочных, выполненных точечной сваркой, в связи с чем используются специальные герметики и оборудование, а это отображается на структуре и оснащенности сборочных цехов.
7. Большая номенклатура и сложность монтируемого бортового оборудования и механизмов. Разнообразие систем на ЛА гидравлическая, пневматическая, электрическая и др., жесткие требования к их надежности. Многие системы подвергаются многократным испытаниям и регулированию, автономной и комплексной отработке.
8. Высокие требование к качеству и надежности ЛА, обеспечение которых усложнено тем, что каждый выпускаемый ЛА не может быть проверен и испытан запуском, кроме самолетостроительных изделий. Поэтому высокая надежность любого ЛА обеспечивается системой имитационных испытаний на специальных стендах, в результате которых должны быть проверены все приборы и узлы, как в автономном так и в комплексном действии. Необходимая высокая надежность обуславливает до 40% и более контрольно-испытательных работ.
9. Высокие насыщенность и наполненность внутреннего пространства ЛА заставляют применять при сборке и монтаже приборных и переходных отсеков аппаратуры, коммуникаций и разъемов макеты этих узлов и предварительно исследовать способы размещения всех элементов, что обуславливает высокую трудоемкость и увеличивает стоимость ЛА.
10. Быстрое развитие современной техники и смена объектов производства ставят перед производством задачи по быстрому освоению и выпуску необходимого количества новых конструкций, для чего необходимо обеспечить быструю переналадку производства, применять быстропереналаживаемое оборудование, нормализованную оснастку, типовые технологические процессы и групповые

методы обработки. С целью сокращения сроков подготовки производства их совмещают с периодом проектирования ЛА.

Несмотря на все эти меры сокращение сроков технической подготовки производства ЛА остается до сих пор одной из самых острых проблем, что вызывает необходимость изучения научных основ и разработки единой системы технологической подготовки производства. Важной задачей является повышение уровня механизации процессов сборки, существенное увеличение ресурса соединений и, следовательно, ЛА в целом. В перспективе имеется четкое стремление уменьшить объем сборочных работ за счет:

- более широкого применения монолитных конструкций (панели, шпангоуты, балки и др.);
- увеличения размеров сборочных единиц, что возможно при увеличении размеров полуфабрикатов (листов, профилей).

Применение монолитных конструкций и крупногабаритных полуфабрикатов позволяет уменьшить количество деталей, стыков и элементов крепежа, снизить массу и повысить ресурс ЛА в целом. В связи с этим будет также изменяться структура производства и уровень его механизации, так как уменьшается объем клепально-сборочных и сварных работ в агрегатных цехах и увеличивается объем работ в механических и заготовительно-штамповочных цехах, где уровень механизации процессов более высок.

1.2. Общая характеристика сборочных и монтажных работ

Технологический процесс изготовления ЛА складывается из конкретных технологических процессов изготовления отдельных деталей, сборки отдельных сборочных единиц, агрегатов и всего аппарата, а также испытаний и контроля.

Технологический процесс сборки складывается из технологических процессов сборки сборочных единиц (нервюр, шпангоутов, лонжеронов, панелей, днищ и т.д.), агрегатов (отсеков, баков, двигателей, посадочных блоков, спускаемых аппаратов и т.д.) и общей сборки агрегатов.

Сборочный процесс, являясь конечным этапом изготовления аппарата, имеет определяющее значение для всего производства. Это выражается в том, что применяемые физико-химические методы обработки деталей должны обеспечить технологические требования сборки и контроля в отношении точности форм, размеров, качества поверхности, взаимозаменяемости, свойств материалов и т.д. А это, в свою очередь, обуславливает определенные требования к заготовкам, полуфабрикатам, комплектующему оборудованию и аппаратуре.

ЛА состоит из большого числа деталей, соединенных в единую конструкцию. Поэтому ЛА рассматривают как сложную систему, для элементов которой определены их взаимные связи, функциальные назначения и соподчиненность. ЛА как система включает в себя подсистемы (корпус-планер, силовая установка, бортовые системы, спецгрузы, взлетно-посадочные устройства и т.д.), которые в свою очередь тоже состоят из подсистем (агрегатов, секций-отсеков, узлов, подузлов), состоящих в конечном итоге из комплектов-деталей.

Для подтверждения сказанного рассмотрим состав ракеты-носителя (РН) "Молния", ее конструктивно-компоновочную схему, последовательность сброса масс в полете и схему членения (рис.1.1, 1.2,1.3). Ракета-носитель "Молния" состоит из четырех боковых блоков Б-Д (ускорителей) первой ступени, центрального блока А второй ступени, блока И, соединенного через ферму с блоком А, разгонного блока Л, на который помещен космический аппарат (КА), и блока осуществления запуска (БОЗ). Блоки Л, КА и БОЗ находятся под головным защитным блоком (ГЗБ) или головным обтекателем (ГО) (см. рис.1.1).

На активном участке выведения (КА) на заданную орбиту происходит сброс масс отработавших элементов конструкции РН по следующей схеме (см. рис.1.2).

1. Старт РН - работают двигатели блоков А, Б-Д.
2. После выработки топлива боковые блоки сбрасываются. Работают двигатели блока А.
3. После прохождения плотных слоев атмосферы сбрасывается ГО.
4. После выработки топлива отстыковывается блок А. Работает двигательная установка блока И.
5. Сбрасываются створки хвостового отсека блока И.
6. По достижении предварительной орбиты и заданной скорости отстыковывается блок И.
7. После уточнения орбиты включается двигатель блока Л, который после выхода КА на нужную орбиту отстыковывается от него.

Следует отметить, что каждая отделяющаяся часть должна быть конструктивно цельной единицей и фактически является подсборкой блока ступени или РН. После последовательного сброса соответствующих частей конструкции РН оставшаяся часть является не чем иным, как самостоятельной ракетой, что накладывает свои требования по её центровке и балансировке, а также оснащению всеми необходимыми системами для её работы.

В конструкциях КА также можно выделить характерные, наиболее часто встречающиеся агрегаты и системы [5].

Корпус КА служит основным силовым элементом, к которому крепятся агрегаты и системы КА.

Корпус состоит из герметичных и негерметичных отсеков либо из их сочетаний. Отсеки соединяются между собой силовыми узлами, рамами, обечайками (рис.1.4).

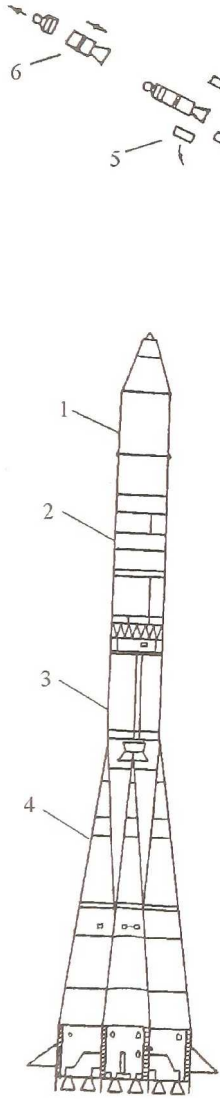


Рис.1.1. Ракета-носитель "Молния":
1 головной блок (обтекатель, космический аппарат, блок Л, блок осуществления запуска); 2 - блок И; 3 - блок А; 4 - боковой блок (Б-Д)

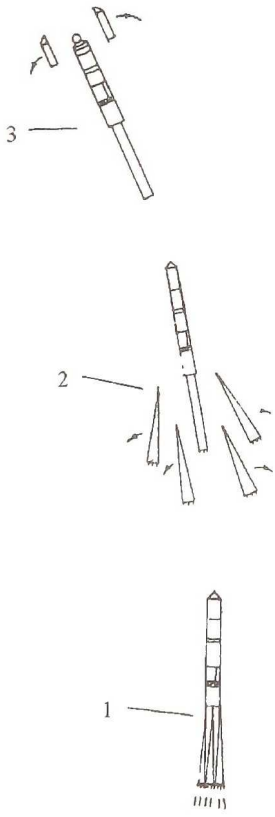


Рис.1.2. Последовательность сброса масс:
1 положение РН "Молния" на старте; 2 - сброс боковых блоков Б-Д; 3 сброс головного обтекателя; 4 сброс блока А; 5 сброс хвостового отсека блока И; 6 - сброс блока И

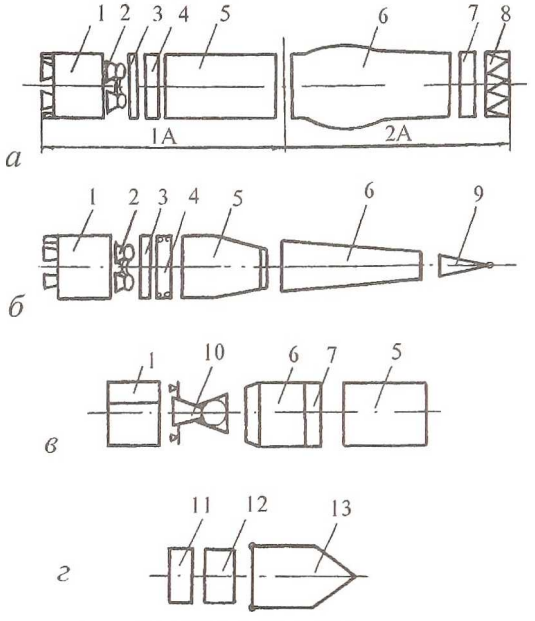


Рис.1.3. Схема членения ракеты-носителя "Молния":

а - схема членения блока А; б - схема членения бокового блока; в - схема членения блока И; г - схема членения головного блока; 1 - хвостовой отсек; 2 - двигатель; 3 - силовые кольца; 4 - блок торовых баков; 5 - бак "Г"; 6 - бак "О"; 7 - приборный отсек; 8 - ферма; 9 - конус; 10 - двигатель; 11 - блок обеспечения запуска блока Л; 12 - блок Л; 13 - головной обтекатель

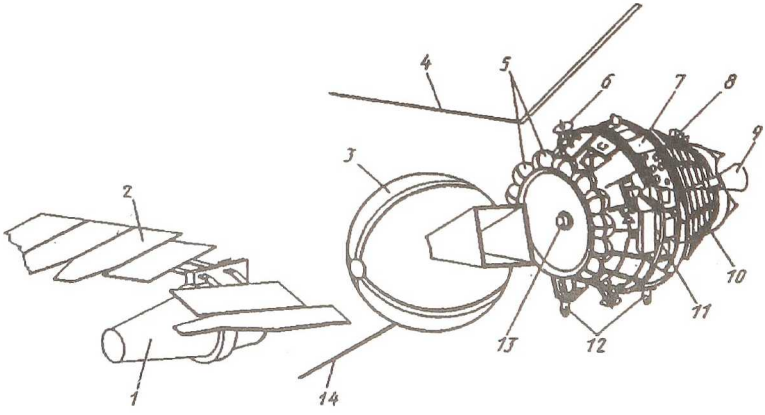


Рис.1.4. Основные агрегаты КА:

1 - навесной отсек; 2 - солнечная батарея; 3 - СА; 4 - антенна командной радиолинии; 5 - комплект шар-баллонов системы исполнительных органов; 6 антенна системы телеизме-рений; 7 - приборный отсек; 8 - двигатели системы ориентации; 9 - пороховая твердотоп-ливная двигательная установка; 10 - радиатор системы терморегулирования; 11 - прибор-ная рама; 12 - инфракрасная вертикаль; 13 - толкатель системы разделения; 14 - антенна "Маяк"

Разновидностью отсеков являются спускаемые аппараты (СА), хотя их можно рассматривать как самостоятельные модули в составе общей компоновочной схемы, которые способны после отделения от КА совершать автономный полет. СА являются наиболее сложными по сравнению с другими типовыми отсеками. Особый тип СА составляют малые капсулы для доставки грузов с орбиты на Землю. СА могут иметь различную аэродинамическую форму шара, конуса, типа "фара" и могут быть снабжены помимо прочих характерных для них систем системами стабилизации и тормозными двигательными установками.

Приборные отсеки предназначаются для размещения различных систем КА и могут быть герметичными, либо не герметичными.

В гермоотсеках поддерживаются заданные параметры давления и температуры.

Агрегатные отсеки предназначены для размещения двигательных установок, элементов систем терморегулирования, энергопитания и т.д.

Специальные отсеки выделяются для размещения целевой аппаратуры. В специальных отсеках часто требуется поддержание особо стабильных термобарических режимов.

Двигательные установки подразделяются на тормозные, корректирующие, совмещенные. Тормозные двигательные установки обычно пороховые твердотопливные, предназначены для выдачи одного тормозного импульса для схода КА с орбиты. Корректирующие двигательные установки многоразового запуска - жидкостные на двухкомпонентном самовоспламеняющемся топливе предназначены для коррекции параметров орбит. Совмещенные и двигательные установки используются для коррекции орбиты, торможения КА при спуске и объединены с системой малых двигателей для ориентации и стабилизации относительно центра масс.

На рис.1.5 показано членение отдельных агрегатов самолета по конструктивным, технологическим и эксплуатационным стыкам и разъемам.

Анализ рис.1.1 1.5 показывает, что конструктивно-технологическое членение предусматривает разбивку конструкции любого ЛА на агрегаты, отсеки, панели, узлы и детали. В связи с этим дадим определение составляющим частям ЛА.

Корпус (планер) является объектом и целью сборочных работ.

Агрегат наиболее крупная часть корпуса, законченная в конструктивном и технологическом отношениях. Агрегатами являются: несущие топливные баки (в ракетоносителях), крыло (в самолетных конструкциях), элементы оперения, а также элементы механизации.

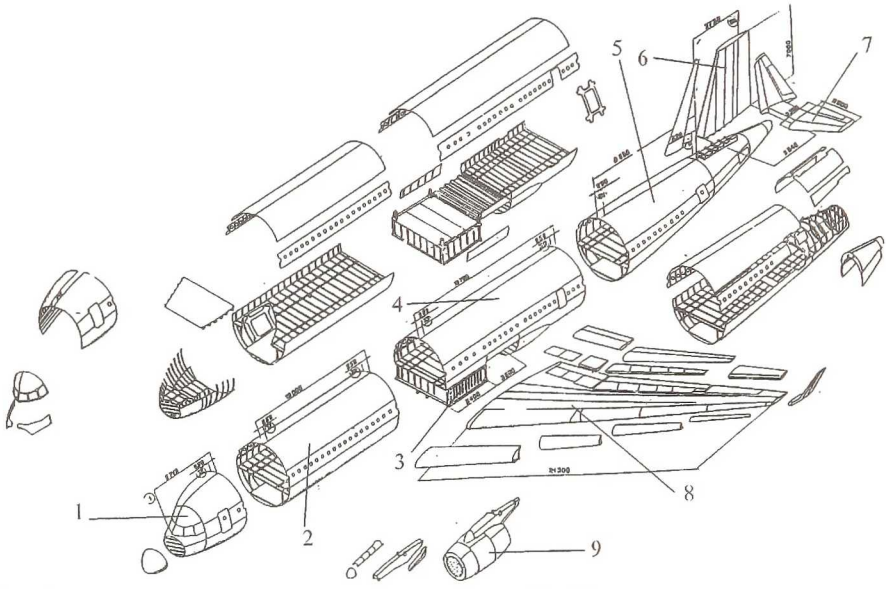


Рис.1.5. Схема технологического членения самолета ТУ-204:
1 носовой отсек фюзеляжа; 2 средний отсек; 4 средний отсек в сборе с центропланом 3; 5 - хвостовой отсек; 6 - киль; 7 - стабилизатор; 8 отъемная часть крыла; 9 - мотогондола

Отсек (секция) часть агрегата, выделяемая сечениями-плоскостями, перпендикулярными или параллельными оси ЛА. Отсек - часть корпуса, секция часть крыла или отсека. Отсек отличается замкнутыми контурами (хвостовой отсек, приборный отсек - обычно клепаной конструкции).

Узел (технологический) наименьшая законченная часть корпуса, агрегата или отсека, состоящая из небольшого количества деталей. Узлами являются шпангоуты, лонжероны, нервюры.

Панель - разновидность технологического узла. Особенность - обшивка является базовой деталью.

Подузел - часть узла.

Деталь - наименьшая неделимая часть системы.

К любому элементу системы могут быть предъявлены требования со стороны вышестоящих элементов и элементов того же ранга. В нашем случае это требование взаимозаменяемости (взаимособираемости).

Все элементы ЛА, за исключением даталей, называются сборочными единицами, которые являются объектами сборки. При этом различают такие виды сборки: общая (предварительная и окончательная); агрегатная; секционная; узловая; панельная.

Бортовая система (БС) это совокупность целесообразно организованных, взаимнозависимых и взаимодействующих

элементов, выполняющих общую функцию. Все бортовые системы являются объектами монтажа. По признаку вида конструкций бортовые системы разбивают на три группы:

- электропроводные;
- трубопроводные;
- механические.

В БС выделяют агрегаты: панели и узлы, но они принципиально отличаются от агрегатов и панелей корпуса. Провода в бортовых системах считаются деталями.

Сборка совокупность технологических операций по установке деталей во взаимно-правильное положение и соединение их в узлы, панели, агрегаты и ЛА в целом.

Монтаж это установка агрегатов, бортовых систем, прокладка коммуникаций и соединение их между собой и с элементами корпуса или планера ЛА.

Кроме бортовых систем объектами монтажа являются силовые (двигательные) установки и спецгрузы (СГ).

Необходимость членения любого ЛА на детали, узлы, панели, отсеки и агрегаты диктуется требованиями производства и необходимостью иметь конструктивные, эксплуатационные разъемы и стыки.

Стыковка - сборка применительно к относительно крупным и достаточно жестким отсекам и агрегатам (хвостовой отсек, несущие баки ракеты-носителя, ступени ЛА и т.п.). Следует отметить, что наличие конструктивных разъемов обусловлено функциональным назначением выделяемых подконструкций. Примером могут служить для самолета элементы механизации, которые должны изменять свое положение в процессе полета.

Технологические стыки создаются с учетом возможностей производства на данном этапе его развития и определяются, в частности, габаритными размерами оборудования.

Эксплуатационные разъемы и стыки создаются с целью замены, осмотра или регулирования различных механизмов и систем в процессе эксплуатации ЛА. В некоторых случаях эксплуатационные разъемы вызываются ограничениями габаритных размеров отдельных агрегатов по условиям их перевозки и хранения на складах.

Для обеспечения эксплуатации и подходов к элементам конструкции и отдельным механизмам наряду с эксплуатационными разъемами делаются различные специальные смотровые лючки, закрывающиеся крышками.

Степень членения ЛА на сборочные единицы, как правило, зависит от его конструкции и программы выпуска. Увеличение объема членения позволяет широко механизировать и автоматизировать сборочные работы, расширить фронт работ и

специализировать труд рабочих. В результате этого повышается производительность труда, сокращается производственный цикл сборки и улучшается качество продукции.

Вместе с тем, при увеличении степени членения увеличивается количество сборочной оснастки и затраты на подготовку и основное производство. Целесообразная при данной программе степень членения самолета определяется на основании технико-экономических расчетов.

В соответствии с членением конструкции сборку ЛА выполняют в несколько этапов.

Первый этап, включающий сборку узлов и панелей из деталей, называют узловой сборкой.

На втором этапе из узлов, панелей и деталей собирают отсеки и агрегаты, проводят агрегатную сборку.

На третьем этапе выполняется сборка ЛА из агрегатов - окончательная (общая) сборка.

Заключительным этапом является отработка всех систем.

При разработке технологических процессов сборки, проектировании приспособлений, выборе оборудования и инструмента для выполнения сборочных работ необходимо руководствоваться требованиями, предъявляемыми к точности собираемого узла или агрегата.

При сборке космических аппаратов необходимо учитывать следующие требования к точности воспроизведения геометрических параметров (рис.1.6) [71]. При сборке самолетов точность выполнения аэродинамического контура зависит от назначения самолета, его конструктивных особенностей и скорости полета. Ориентировочные данные по отклонениям от теоретического контура для различных агрегатов самолета приведены в табл.1.1 [25].

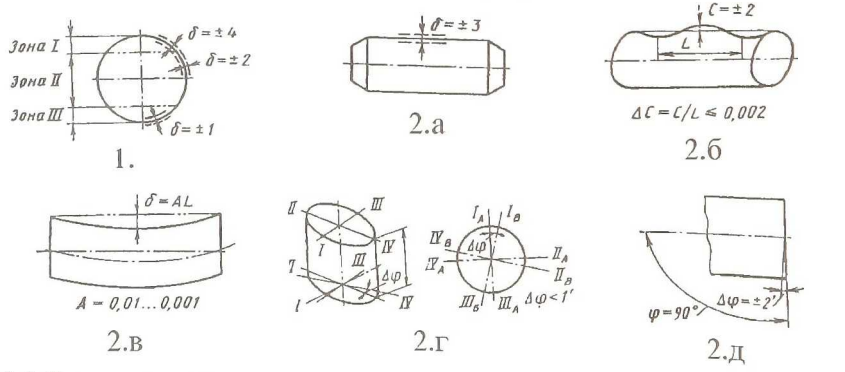


Рис.1.6. Допустимые отклонения геометрических параметров космических аппаратов:
1 - отклонения от теоретического контура СА; 2 корпус: а - отклонения от теоретического контура; б волнистость; в изгиб оси; г - закрутка шпангоута; д - неперпендикулярность шпангоута продольной оси

Таблица 1.1.

Допуски на точность контура агрегата

Агрегаты	Часть агрегата	Отклонения от теоретического контура, мм
Фюзеляж	Носовая	±2,0
	Средняя и хвостовая	±3,0
Крыло Стабилизатор Киль	Передняя 30...40% Центральная и хвостовая	±1,0 ±2,0
Мотогондола	Передняя (20%)	±1,0
	Задняя	±2,0

Допуск на выступание головок потайных заклепок относительно поверхности обшивки в передней и центральной частях крыла находится в пределах 0,05...0,15 мм, в хвостовой части - 0,05...0,2 мм.

В этих же пределах допускаются и углубления в обшивке, получающиеся при точечной сварке. Зазоры в местах стыков отдельных листов обшивки на крыльях не должны быть более 1 мм, а на фюзеляже - не более 1,5 мм, допуски на установочный угол α и на угол поперечного V крыла равны каждый ~ 6′ [70].

Большинство деталей ЛА отличается малой жесткостью и даже не сохраняет размеров под собственным весом. Изготовление точных маложестких конструкций требует применения на порядок более точных жестких сборочных приспособлений. Проектирование и изготовление такой оснастки занимает значительное время на этапе подготовки производства.

Для ЛА среднего класса отклонение от теоретических обводов корпуса соответствует 12-му квалитету. Сборка конструкций из маложестких крупных деталей с такой точностью является сложной технологической задачей. Обеспечение данной точности достигается применением системы методов: плазово-шаблонного (ПШМ), эталонно-шаблонного (ЭШМ), координатно-шаблонного (КШМ), расчетно-плазового (РПМ), метода объемной увязки (МОУ), метода координатно-аналитической увязки (МКАУ), а также подгоночных работ. Поэтому целесообразно стремиться к таким аэродинамическим обводам, которые могут быть заданы аналитическим путем, что облегчает контроль, для которого используют оптико-механические системы.

Как было отмечено, объем сборочных работ определяется конструкцией ЛА, физико-механическими свойствами материалов, из которых он изготовлен, и видами заготовок, из которых изготовлены отдельные детали и узлы.

Сборка организуется по схеме параллельно-последовательных операций, начиная со сборки подузлов, узлов, панелей, агрегатов и кончая общей сборкой ЛА.

На основе разработанной последовательности сборочных операций составляется схема сборки, которая является одним из основных технологических документов для сборочных цехов.

В схему сборки вносят указания о порядке комплектования собираемого изделия деталями и узлами, а также технические требования на детали и узлы, определяющие, в каком виде они подаются на сборку.

На объем и содержание сборочных процессов существенно влияют конструктивно-технологические особенности объекта производства.

Как было отмечено ранее, корпус среднестатистического ЛА содержит более 10 тыс. наименований деталей, более 10 тыс. болтов и около 100 тыс.заклепок. Снизить многодетальность можно в результате применения монолитных конструкций, сотовых конструкций, деталей из композиционных материалов.

Применение монолитных деталей приводит к снижению объема сборочно-монтажных работ и, как правило, к снижению трудоемкости. Однако крупногабаритные панели (монолитные) должны применяться ограничено, так как приводят к снижению ресурса.

Среднестатистический ЛА состоит на 70% из алюминиевых и других легких сплавов, на 20% из неметаллов. Тенденция снижения применения легких сплавов пока не наблюдается. При сборочных работах широко выполняются следующие операции:

- обработка сопряженных поверхностей;
- обработка отверстий под болты и заклепки;
- сварка;
- правка при сборке (упругие деформации);
- штамповка гнезд под потайные головки болтов и заклепок.

Непрерывное совершенствование конструкций ЛА, насыщение их многочисленными системами бортового оборудования привело к большой плотности оборудования на единицу объема. Объем монтажных работ зависит от типа ЛА, его размеров и назначения.

Монтажные работы могут выполняться на всех этапах или на этапах агрегатной и окончательной сборки. Сборочные и монтажные работы составляют 45...55% общей трудоемкости, а производственный цикл их выполнения занимает 50...75% всего цикла изготовления ЛА и зависит от его типа и конструкции.

Сборочно-монтажные работы характеризуются большим объемом ручных и машинно-ручных операций (до 85% общего объема). До сих пор применяются ручные приемы при установке и фиксировании деталей в сборочных приспособлениях, установке и

монтаже оборудования, прокладке коммуникаций и т.д. Уровень механизации и автоматизации сборочных работ составляет 25%, а монтажных работ - 10%.

Поэтому при проектировании бортового оборудования необходимо предусматривать максимальное завершение монтажных работ на панелях, отсеках и агрегатах ЛА, применение зонального расположения оборудования в отсеках, наибольшую независимость выполнения отдельных монтажных работ, а также наличие свободных подходов к зонам монтажа и возможность применения механизации и автоматизации процесса.

Монтажные работы имеют свои специфические особенности. Во-первых, в большинстве случаев бортовые системы монтируются в стесненных условиях. Во-вторых, агрегаты и приборы бортовых систем очень чувствительны к внешним механическим воздействиям и загрязнению, поэтому малейшая небрежность при транспортировке может привести к нарушению их работоспособности. В-третьих, часто невозможно предварительно полностью собрать какую-либо систему бортового оборудования, так как элементы системы значительно удалены друг от друга. Эти особенности монтажа обуславливают необходимость особо четкой организации работ и тщательного контроля качества выполнения всех монтажных операций.

Для обеспечения высокого качества и надежности бортового оборудования все системы подвергаются конструктивно-технологической отработке на теоретических плазах (плоских и объемных), на действующих плазах, образующих отдельные функциональные и комплексные системы, на технологических агрегатах. При этом проводят не только геометрическую увязку, но и функциональную отработку систем, методов и средств их контроля.

Все комплектующие элементы бортового оборудования, приборы, материалы и полуфабрикаты подвергаются 100%-му входному контролю. Определенные группы монтажных операций закрепляются за рабочими местами и исполнителями.

Смонтированные системы проходят выходной автоматизированный контроль в условиях, приближающихся к эксплуатационным, и испытания для приработки отдельных элементов радио- и электрооборудования.

Монтажные работы выполняются как в агрегатно-сборочных цехах совместно с процессами сборки, так и в цехе общей сборки. При проведении работ в агрегатных цехах более полно используется механизация труда, что обусловлено возможностью лучшего доступа к местам монтажа систем и оборудования. Совершенствование технологических процессов монтажа предусматривает все более тесную связь монтажных работ со сборочными и снижение объема монтажных работ в цехе общей сборки.

1.3. Методы сборки и сборочные базы

Летные качества ЛА определяются точностью выполнения аэродинамических контуров и поверхностей, их положением в воздушном потоке и относительно базовых осей. Поэтому вопросы обеспечения точности изготовления обводообразующих элементов конструкций, сопряжения с ними деталей, выходящих на аэродинамическую поверхность, точности при соединении агрегатов или отсеков по стыкам и разъемам играют весьма важную роль.

Узлы и агрегаты ЛА обычно собираются из крупногабаритных нежестких деталей, которые не могут быть носителями размеров, в то время как к самим узлам и агрегатам предъявляются сравнительно высокие требования по точности.

Детали ЛА при соединении и в узлы и агрегаты должны занимать вполне определенное положение и выполнять определенные функции [29, 53, 70]. Установка деталей в сборочное положение осуществляется по сборочным базам.

Сборочная база это поверхность на каждой детали или на элементах сборочного приспособления (фиксаторах), которая определяет положение деталей в сборочной единице относительно друг друга. При сборке используется ряд таких поверхностей.

Типовой технологический процесс сборки узла, панели, агрегата на заклепках и болтах складывается из следующих основных этапов.

1. Установка деталей или предварительно собранных сборочных единиц в сборочное положение по соответствующим сборочным базам.
2. Временное соединение деталей и сборочных единиц в этом положении любым способом (технологическими болтами, технологическими заклепками, специальными фиксаторами).
3. Образование отверстий под заклепки и болты.
4. Установка заклепок и болтов.
5. Снятие технологических заклепок и болтов, фиксаторов и установка на их место предусмотренных чертежами элементов крепежа.

Важными условиями получения узлов, панелей и агрегатов требуемых размеров и формы являются точность изготовления деталей, в том числе их сборочных баз базовых поверхностей, и точность изготовления сборочных приспособлений, в том числе их элементов, несущих сборочные базы.

Детали, узлы, панели, отсеки и агрегаты, поступающие на сборку, должны удовлетворять требованиям геометрической взаимозаменяемости. Под ней понимают идентичность деталей и сборочных единиц по геометрическим размерам и форме. Детали и сборочные единицы должны удовлетворять также и требованиям

физической взаимозаменяемости, которая определяет идентичность деталей и сборочных единиц по физическим свойствам массе, центровке, жесткости и т.п.

Известно, что существуют два способа изготовления и сборки деталей - независимый и зависимый. В производстве ЛА наиболее широкое применение получило зависимое изготовление дета-лей. Это обусловлено тем, что детали ЛА, изготовленные из листов, профилей, труб не имеют, как правило, достаточной жесткости и под действием собственной массы изгибаются, закручиваются, изменяют форму. Сборка узлов, панелей, отсеков из таких деталей производится специфическими методами - в специальных приспособлениях, которые в свою очередь изготавливаются по эталонной оснастке и жестким носителям формы и размеров изделий (шаблоны, мастер-плиты, эталоны, макеты поверхностей, макеты стыков). Детали ЛА также изготавливаются по жестким носителям размеров и формы - болванкам, формблокам, шаблонам. Следова-тельно, размеры и форма готовых деталей, узлов и других сборочных единиц, размеры и форма эталонов и рабочей оснастки, в том числе сборочных приспособлений, взаимосвязаны и зависят друг от друга. При зависимом изготовлении особое значение приобретает увязка, т.е. согласование форм и размеров эталонной и технологической оснастки как для изготовления деталей, так и для сборки узлов, панелей, агрегатов. Сущность увязки обеспечение совпадения обводов (прежде всего аэродинамических контуров) в рассматриваемой зоне по всей поверхности каркаса, обшивки, фиксаторов сборочного приспособления, координация центров отверстий под стыковые болты в местах стыков агрегатов относительно обводов (базовых осей и плоскостей).

Принцип зависимого изготовления деталей реализуется на всех предприятиях по производству ЛА в виде плазово-шаблонного метода, который и является основным методом обеспечения геометрической взаимозаменяемости деталей и сборочных единиц.

При независимом изготовлении деталей обеспечение геометрической взаимозаменяемости достигается выдерживанием их размеров по сопрягаемым поверхностям (сборочным базам) в пределах установленных допусков. Детали, входящие в одну сборочную единицу, изготавливаются независимо друг от друга. Этот принцип применяется при изготовлении жестких деталей, не изменяющих свои размеры и форму под действием собственной массы, и деталей, не входящих в аэродинамические обводы ЛА (детали переходных и приборных отсеков, пневмо- и гидросистем, тяги, кронштейны систем управления и др.).

Точность изготовления деталей, образование на них базовых плоскостей и точность изготовления сборочных приспособлений, как

отмечалось ранее, являются важнейшими условиями получения требуемых формы и размеров узлов и агрегатов, определяют условия взаимозаменяемости и влияют на эффективность сборочных работ. Высокий уровень взаимозаменяемости деталей, узлов, агрегатов и других сборочных единиц, исключающий или сводящий к минимуму доработку их в процессе сборки, обеспечивается использованием различных групп методов сборки:

- детали устанавливаются по базам, расположенным на основной (базовой) детали. К этой группе относится сборка по сборочным отверстиям (СО), по разметке и по заранее отработанным базовым поверхностям;
- детали и узлы устанавливаются по базам, расположенным на специальном носителе размеров и форм - сборочном приспособлении. Сюда относится сборка с базой от внешней и внутренней поверхностям обшивки, сборка от поверхности каркаса, сборка с базированием по координатно-фиксирующим отверстиям (КФО), по отверстиям под стыковые болты (ОСБ).

Изготовление деталей и сборка из них узлов и агрегатов производятся на специальной технологической оснастке, которая в свою очередь изготавливается по эталонной оснастке и жестким носителям форм и размеров изделий. В качестве жестких носителей форм и размеров используются шаблоны, эталоны, макеты поверхностей, мастер-плиты и макеты стыков.

Выбор метода сборки конкретной сборочной единицы зависит от её конструктивных особенностей, жесткости, габаритных размеров и формы деталей, требований к точности.

Рассмотрим перечисленные методы сборки.

Сборка базовой детали. Метод применяется при условии, если детали, входящие в сборочную единицу, имеют большую жесткость. Одна из деталей принимается за базовую, к ней в определенной последовательности присоединяются остальные детали. Детали обрабатываются, как правило, на металлорежущих станках с достаточно высокой точностью. Сборочными базами являются поверхности сопряжения деталей между собой, выполненных с учетом применяемой в общем машиностроении системы допусков и посадок, т.е. с соблюдением заданных зазоров и натягов между деталями. Примером использования этого метода является сборка амортизатора шасси. При этом базовой деталью является шток, который имеет базы для установки других деталей с ответными установочными базами.

Сборка по разметке процесс, при котором взаимное положение деталей, входящих в узел, определяется непосредственно измерением расстояния между ними и по рискам, нанесенным на деталях при разметке. При разметке используются универсальные слесарные инструменты и приспособления (струбцины, керны, метры, циркули,

тиски и т.п.). Возможна разметка деталей фотоконтактным методом и по вырезам на специальном разметочном шаблоне. Данный метод имеет низкие точностные и экономические показатели и применяется в мелкосерийном и опытном производстве при сборке плоских узлов и панелей с одинарной кривизной.

Сборка по сборочным отверстиям (СО) - процесс, при котором детали устанавливаются во взаимно правильное положение путем совмещения отверстий базовой и входящих деталей с последующей их фиксацией цилиндрическим штырьевым фиксатором. Точность установки деталей обеспечивается точностью переноса отверстия на детали и размерами фиксатора.

Базирование по СО возможно при образовании обводов агрегата (рис.1.7, а) и установке в сборочное положение элементов продольного и поперечного набора (рис.1.7, б). При сборке с образованием обводов агрегата размер внешнего обвода определяется следующим соотношением [70]

$$H_x=\delta_1+H_1+H_2+H_3+\delta_2 .$$

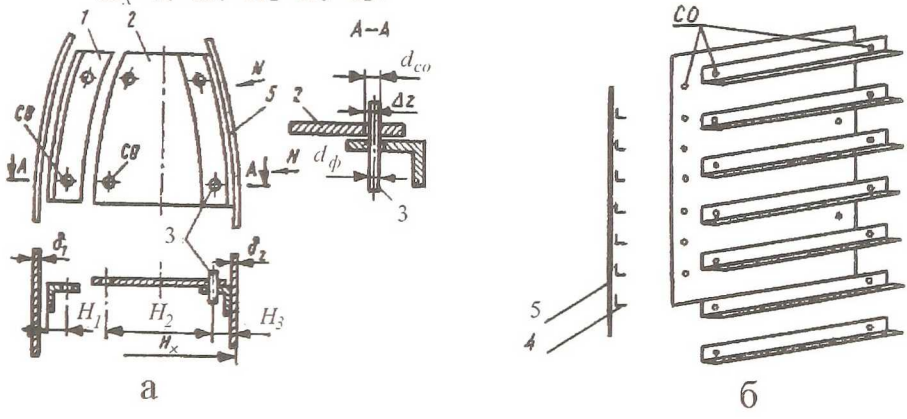


Рис.1.7. Сборка с базой по сборочным отверстиям:
1 - профиль; 2 - стенка; 3 - фиксатор; 4 - стрингер; 5 - обшивка

Погрешность размера по внешнему контуру будет равна

$$\Delta H_x=\Delta\delta_1+\Delta H_1+\Delta H_2+\Delta H_3+\Delta\delta_2+4\Delta z+c_i ,$$

где ΔH_1, ΔH_2, ΔH_3 - погрешности размеров, определяющих положение сборочных отверстий в деталях; $\Delta\delta_1$ и $\Delta\delta_2$ допуски на толщину обшивки; Δz - зазор между диаметром СО и диаметром фиксатора; c_i - погрешность размера вследствие деформации и пружинения.

Сборку по СО проводят в упрощенных приспособлениях или просто на верстаке. Сборочные отверстия в деталях сверлят при изготовлении деталей по шаблонам, по разметке фотоконтактным методом или в приспособлениях для сверления. Места расположения СО указываются на чертежах изделия. Данный метод сборки

применяется при сборке плоских каркасных узлов с невысокими требованиями по точности.

Сборка с базированием по координатно-фиксирующим отверстиям (КФО) осуществляется в приспособлениях. Детали поперечного набора каркаса устанавливают в сборочное положение по КФО, которые имеются как в деталях собираемого изделия, так и в элементах сборочного приспособления.

Так в процессе сборки детали поперечного набора каркаса элементы шпангоутов устанавливают в вилки сборочного приспособления и фиксируют по КФО фиксаторами (рис.1.8). Затем части шпангоута соединяют между собой стыковыми элементами с помощью заклепок или болтов. На подготовленный таким образом каркас устанавливают панель *3* с продольным набором. Панель прижимают к каркасу с помощью лент или другим способом и соединяют со шпангоутами.

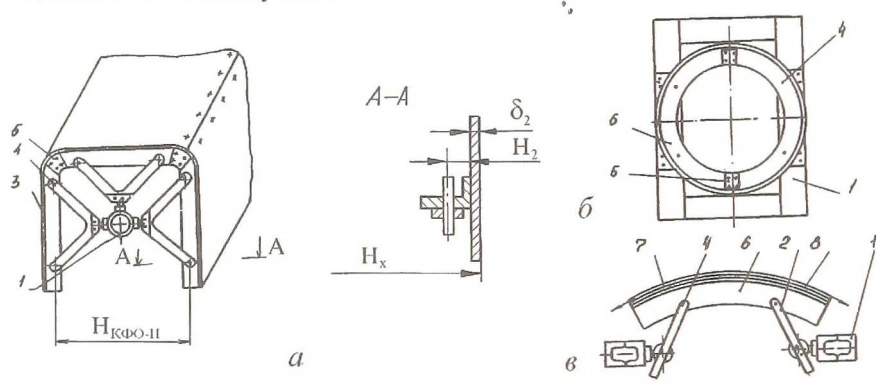


Рис.1.8. Сборка с базой на координатно-фиксирующие отверстия:
а - сборка агрегатов; б - сборка шпангоутов; в - сборка панелей; 1 - каркас приспособления; 2 - вилки приспособления; 3 - панель; 4 - КФО; 5 - стыковые элементы; 6 - шпангоут; 7 - обшивка; 8 - резиновый жгут

Размер по внешнему обводу собранного агрегата

$$H_x=\delta_1+H_1+H_{КФО\text{-}П}+H_2+\delta_2 .$$

Погрешность размера по внешнему обводу

$$\Delta H_v=\Delta\delta_1+\Delta H_1+\Delta H_{КФО\text{-}П}+\Delta H_2+\Delta\delta_2+4\Delta z+c_i ,$$

где $H_{КФО\text{-}П}$ - размер между координатно-фиксирующими отверстиями в вилках сборочного приспособления; $\Delta H_{КФО\text{-}П}$ - погрешность размера $H_{КФО\text{-}П}$. H_1, H_2, δ_1, δ_2, $4\Delta z$ и c_i те же, что и при сборке по СО.

Число КФО устанавливают из условий допустимой деформации сборочной единицы под действием собственной массы и возможных внешних нагрузок, возникающих при сборке. Так, например, для шпангоутов размером до 1500 мм их должно быть не менее двух, для шпангоутов более 1500 мм не менее трех-четырех. Располагают КФО всегда на расстоянии кратным 50 мм относительно

базовых осей изделия (ось симметрии, строительная горизонталь и др.) и относительно друг друга. Сверление и разделка КФО в деталях выполняются в заготовительных цехах по кондукторам или на плазкондукторе.

Точность получаемых обводов зависит от точности расположения КФО в деталях и элементах сборочной оснастки и точности обшивки по толщине.

Сборка по КФО разработана при освоении производства широкофюзеляжных самолетов. Она позволяет значительно упростить конструкцию сборочных приспособлений (не имеют рубильников и ложементов) как при узловой, так и при агрегатной сборке. Однако при сборке по КФО не удается добиться высокой точности сборки.

При сборке **по поверхности каркаса** сначала собирается каркас, с базой на который устанавливают обшивку.

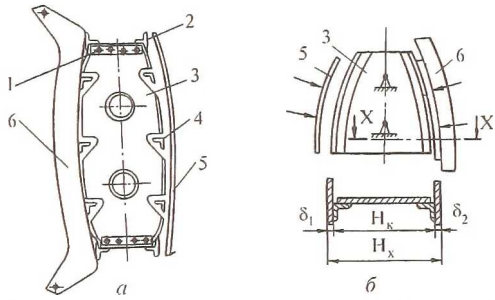


Рис.1.9. Сборка с базой по поверхности каркаса:

а - установка панели; б - установка обшивки; 1 - стыковой профиль; 2 - лонжерон; 3 - нервюра; 4 - стрингер; 5 - обшивка; 6 прижимной рубильник

Существует несколько вариантов этого метода базирования. На рис.1.9,а показан случай, когда панель с элементами продольного набора устанавливают на каркас и прижимают к поверхности, а на рис.1.9, б на каркас устанавливается обшивка. При этом методе возможна установка монолитных панелей и присоединение обшивки к каркасу с помощью клея.

Для узлов и агрегатов клепаной конструкции размер собранного агрегата или отсека по внешнему обводу можно определить по выражению

$$H_x = H_k + \delta_1 + \delta_2 ,$$

где H_x - номинальный размер внешнего обвода собираемого изделия в рассматриваемом сечении; H_k - номинальный размер каркаса; δ_1 и δ_2 - номинальная толщина обшивок (панелей).

Погрешность размера по внешнему обводу соответственно равна:

$$\Delta H_x = \Delta H_k + \Delta\delta_1 + \Delta\delta_2 + c_i .$$

При соединении обшивки с каркасом с помощью клея или припоя (пайка) погрешность наружного обвода будет равна:

$$\Delta H_x = \Delta H_k + \Delta\delta_1 + \Delta\delta_2 + \Delta\delta_1' + \Delta\delta_2'' + c_i ,$$

где $\Delta\delta_1'$, $\Delta\delta_2''$ погрешности по толщине слоя клея; ΔH_k - погрешность размера каркаса H_k.

Таким образом, отклонение ΔH_x в точности обвода изделия зависит от точности образования обводов каркаса и отклонений толщины обшивки. Данный метод характеризуется невысокой точностью, сложной и дорогой оснасткой и применяется при сборке нерасчленяемых узлов.

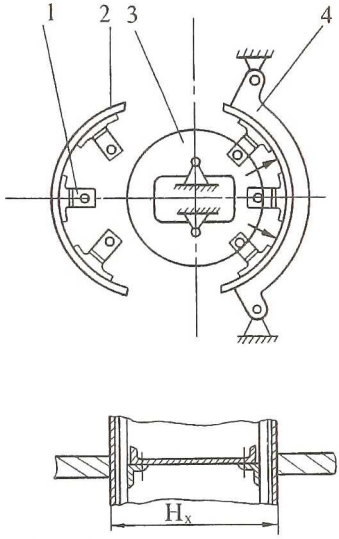


Рис.1.10. Сборка с базой на внешнюю поверхность обшивки:
1 - компенсатор; 2 - панель; 3 - шпангоут; 4 - рубильник

Сборка с базированием по внешней поверхности обшивки. При этом методе сборки обшивка или панель прижимаются наружным обводом к открытым поверхностям приспособления на период соединения её с каркасом. Соединение с каркасом производится через промежуточную деталь компенсатор (рис.1.10).

После сборки наружный обвод обшивки соответствует внешнему обводу агрегата. Размер H_x по внешнему обводу в рассматриваемом сечении равен размеру приспособления

$$H_x = H_n .$$

Погрешность размера

$$\Delta H_x = \Delta H_n + c_i .$$

Данный метод характеризуется высокой точностью сборки, требует изготовления сложной, дорогостоящей оснастки и применяется при сборке узлов и агрегатов расчлененной конструкции с высокими требованиями по точности сборки.

Сборка с базированием по внутренней поверхности обшивки. При этом методе базирования панель (обшивка) прижимается внутренней поверхностью к опорным поверхностям приспособления (специальным макетным нервюрам или шпангоутам) на период её соединения с каркасом через компенсатор (рис.1.11).

Собранные лонжероны *1* и *5* устанавливают по БО на фиксаторы и закрепляют в сборочном приспособлении, между лонжеронами устанавливают макетные нервюры *7* на технологические болты, базируя их относительно лонжеронов по СО в приклепанных к лонжеронам профилях и нервюрах с базой по СО и соединяют их с лонжеронами заклепками. На собранный каркас устанавливают панель *2* и соединяют с помощью компенсаторов.

Размер внешнего контура при данном методе сборки равен

$$H_x = H_n + \delta_1 + \delta_2 .$$

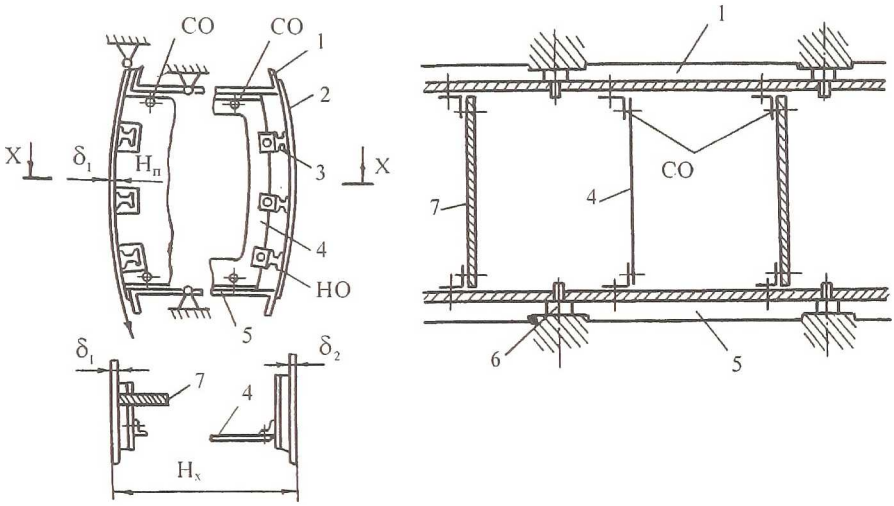


Рис.1.11. Схема базирования на внутреннюю поверхность обшивки:
1 - лонжерон; 2 - панель; 3 - компенсатор; 4 - нервюра; 5 - лонжерон; 6 - фиксатор; 7 - макетная нервюра

Погрешность размера

$\Delta H_х=\Delta H_п+\Delta\delta_1+\Delta\delta_2+c_i$.

Если макетная нервюра состоит из двух частей, которые устанавливаются на фиксаторы на элементы сборочного приспособления, то к погрешности приспособления $\Delta H_п$ нужно прибавить $4\Delta z$ - погрешность базирования составных частей макетной нервюры. Данный метод позволяет провести сборку с достаточной точностью и имеет хорошие экономические показатели.

Сборка с базированием по ОСБ (отверстия под стыковые болты) используется при установке элементов фланцевых и вильчатых стыков (рис.1.12).

Отверстия под стыковые болты в деталях совмещают с базовыми поверхностями приспособления и соединяют детали, образующие стык с элементами каркаса.

На рис.1.12, а показана схема базирования стыковой гребенки по ОСБ. В этом случае базирующие болты вставляются в отверстия стыковой гребенки и отверстия стапельной плиты, определяя тем самым положение гребенки относительно обшивки, которая опирается на рубильники приспособления.

После сборки изделия (узла, панели, отсека) и освобождения его из приспособления расстояния $W_х$ между осями ОСБ и углы наклона $\alpha_х$ этих осей на изделии должны определяться параметрами сборочного приспособления и погрешностями деформации изделия:

$$W_х=W_п+4\Delta z+c_i;$$
$$\alpha_х=\alpha_п+4\Delta z+\Delta\alpha_i,$$

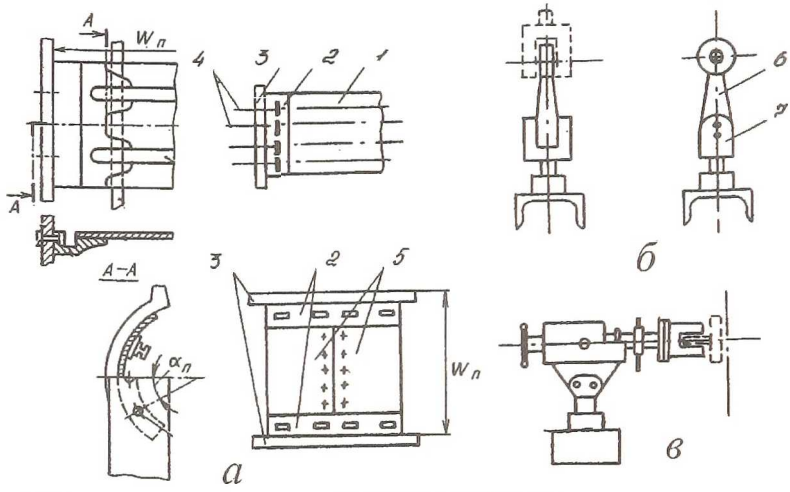


Рис.1.12. Сборка с базой на отверстия под стыковые болты:
а - сборка панелей и агрегатов; б, в - фиксаторы вильчатых стыков; 1 - обшивка; 2 - гребенка; 3 - стапельная плита; 4 - стрингеры; 5 - панель; 6 - фиксатор; 7 - вилка

где W_n расстояние в приспособлении между центрами стыковых поверхностей; α_n угол в приспособлении между базовыми осями и осями, определяющими положение стыковых узлов; c_i и $\Delta\alpha_i$ погрешности линейных и угловых размеров вследствие деформации конструкции после сборки; Δz - погрешность из-за зазора при установке узлов на ОСБ.

Данный метод базирования применяется, как правило, при сборке сравнительно жестких и небольших по длине отсеков.

Точность и технико-экономические показатели методов сборки. При сборке конкретного узла, отсека или агрегата могут применяться сразу несколько методов и различные сборочные базы. В этом случае основным методом сборки считается тот, при котором формируется внешний обвод узла, отсека, агрегата. В соответствии с требованиями к точности внешних обводов агрегатов ЛА определяют метод (или методы) сборки, удовлетворяющий этим требованиям. При любом методе сборки погрешность размера по внешним обводам H_x должна быть меньше допуска на этот размер, т.е.

$$\Delta H_x \leq 2\delta_a .$$

Здесь δ_a допуск на одну сторону обвода агрегата относительно теоретического контура.

Методы сборки в зависимости от конструкции изделия, программы выпуска, оснащения производства оборудованием, инструментом характеризуются различными технико-экономическими показателями. Приведем некоторые данные по точности и технико-экономическим показателям (табл.1.2), полученные для

различных методов сборки при определенных заданных условиях (толщина и допуски на толщину обшивки, панели, допуски на размеры при образовании СО и КФО, допуски на отклонение за счет зазоров в отверстиях при фиксации по СО и КФО и т.д.).

Таблица 1.2.

Расчетные данные по точности внешнего обвода агрегата и технико-экономические показатели сборки

Метод базирования	ΔH_x, мм	$\delta_{обв}$, мм	Показатель, %			
			G_m	C_o	C_T	$Ц$
По внешней поверхности обшивки	±0,7	±0,35	100	100	100	100
По поверхности каркаса	±1,0	±0,50	95	90	115	120
По внутренней поверхности обшивки	+1,5 -1,7	±0,8	40-60	35-50	65	90
По сборочным отверстиям	±2,4	±1,2	30-60	25-50	70	80
По координатно-фиксирующим отверстиям	+2,2 -2,0	+1,1 -1,0	45-55	40-70	60	85

Примечание. Погрешность на одну сторону обвода $\delta_{обв}=0,5\Delta H_x$.

Здесь G_m расход металла на оснастку; C_o себестоимость изготовления технологической оснастки; C_T технологическая стоимость сборки; $Ц$ цикл сборки узлов, панелей, агрегатов. Технико-экономические показатели метода сборки с базой по внешняя поверхность обшивки приняты за 100%.

При изменении конструкции изделия и заданных условий сборки количественные значения всех показателей при различных методах сборки будут иными, чем приведенные в таблице. Однако основная тенденция изменения показателей в зависимости от метода сборки сохраняется.

Наибольшую точность по внешним обводам будут иметь узлы, отсеки и агрегаты при сборке с базой внешняя поверхность обшивки, наименьшую при сборке по КФО и СО. Наилучшие показатели в сфере подготовки производства будут при сборке по СО и КФО, а также при сборке по внутренней поверхности обшивки (более простая, менее трудоемкая и металлоемкая оснастка). При этих же методах наименьшая технологическая себестоимость и наименьший цикл сборки узлов и агрегатов.

При выборе метода сборки в первую очередь должны быть удовлетворены требования по точности внешних обводов, узлов и агрегатов. Если эти требования удовлетворяются при нескольких методах, выбирают метод, имеющий наилучшие технико-экономические показатели.

Приведенные в табл.1.2 данные следует рассматривать как качественную оценку рассматриваемого метода базирования. Более

точные количественные технико-экономические показатели по каждому методу базирования можно получить только для конкретного изделия при строго зафиксированном технологическом процессе.

1.4. Виды соединений, применяемых в производстве летательных аппаратов

При сборке узлов, панелей, секций и агрегатов детали (листы, профили) соединяются между собой в определенном положении и последовательности, которые указываются в чертежах и технических условиях.

По конструкции соединения деталей между собой, как и соединения панелей, секций и агрегатов, могут быть неразъемными и разъемными.

При неразъемных соединениях детали (панели, секции, агрегаты) нельзя отделять друг от друга без частичного или полного их разрушения. Неразъемные соединения осуществляются клепкой, сваркой, пайкой и склеиванием. В таких соединениях детали (панели, секции и т.д.) могут быть неподвижными и подвижными относительно друг друга.

Неподвижные неразъемные соединения могут выполняться силовыми точками или непрерывным швом.

Соединения, выполняемые силовыми точками заклепками, сварными точками, характеризуются ослаблением соединяемых деталей из-за отверстий под заклепки и болты и нагрева деталей в зоне постановки сварных точек; концентрацией напряжений в детали в зоне постановки силовой точки при нагружении конструкции; невысокой производительностью труда при постановке силовых точек вследствие прерывистости выполнения соединений.

Соединения, выполняемые непрерывным швом, осуществляются в основном сваркой. Характерными признаками таких соединений являются ослабление соединения деталей при их нагреве в процессе сварки, значительная концентрация напряжений в зоне шва, возможность механизации и автоматизации процесса.

При сварке значительно проще, чем при клепке, получить герметичные прочно-плотные соединения, поэтому наиболее широкое распространение сварка получила при производстве изделий космической техники.

С совершенствованием процессов сварки расширяется область её применения в производстве самолетов, и постепенно сварка вытесняет клепку. Статистика показывает, что в конструкции современного самолета протяженность сварных швов составляет более 1500 м [17].

Пайка как способ соединения применяется ограниченно, обычно для изготовления сотовых и слоистых панелей.

В последние годы все большее значение приобретают соединения деталей в узлы, панели и секции склеиванием. Клеевые соединения обладают достаточно высокими удельной прочностью, жесткостью и герметичностью.

Все чаще находят применение комбинированные соединения (точечная сварка + склеивание, клепка + склеивание, клепано-болтовое соединение). Такие соединения обладают всеми признаками соединений силовыми точками и непрерывным швом.

Выбор того или иного вида соединения зависит от конструкции ЛА и материалов, из которых изготовлены их отсеки, узлы и детали.

К неподвижным разъемным следует отнести соединения деталей болтами, винтами и шурупами, а также соединения деталей из труб с тугой посадкой и на конус. Эти соединения обеспечивают неизменное положение деталей (панелей, секций и др.) относительно друг друга и позволяют разъединять последние без разрушения.

Болтовые соединения нашли широкое применение как в самолетостроении, так и при сборке КА и РН.

Соединения отсеков фюзеляжа, панелей крыла, элементов силового набора осуществляются с помощью болтов. Болтами стыкуются по торцевым шпангоутам и отдельные отсеки РН. В условиях эксплуатации такие соединения никогда практически не разбираются, они остаются в соединенном состоянии до окончания срока службы ЛА.

К подвижным разъемным соединениям следует отнести винтовые передачи, зубчатые пары, валы и подшипники скольжения, шарнирные соединения и др. При этих соединениях детали (панели, агрегаты) могут изменять положение относительно друг друга и могут быть свободно и многократно разъединены и соединены без разрушения.

При выборе вида соединения учитывают конструктивные, прочностные, технологические и эксплуатационные требования к нему, а также свойства материалов, из которых изготовлены соединяемые детали.

Технологические процессы получения заклепочных и болтовых соединений приведены в разделе 3 данного учебника, а технологические процессы сварки и пайки - в разделе 2.

1.5. Расчет процессов сборки на точность

Основные понятия и формулы расчета. Любой технологический процесс сборки узла или агрегата, а также разработка приспособления для сборки должны заканчиваться проверкой точности

собираемого изделия и приспособления. Различают заданную (требуемую) точность, которую назначает конструктор при разработке рабочих чертежей изделия, действительную точность, получаемую в результате изготовления изделия и определяемую измерением его, и ожидаемую (расчетную) точность, устанавливаемую расчетом. Последняя характеризует качество технологического процесса и его оснащения. Поэтому для оценки точности сборки необходимо определить ожидаемую точность, сопоставить её с заданной, а также провести анализ тех технологических или конструктивных мероприятий, которые необходимы для получения точности в соответствии с техническими условиями (ТУ).

Как уже отмечалось, при производстве ЛА широкое применение нашел принцип связанного изготовления деталей. В этом случае очень важное значение приобретает не только точность изготовления деталей, но и точность их увязки. Если точность изготовления двух объектов А и Б, соединяемых между собой в узел, характеризуется их погрешностями изготовления δ_A и $\delta_Б$, равными разности между их действительными ($A_д$, $Б_д$) и номинальными ($A_н$, $Б_н$) размерами:

$$\delta_A = A_д - A_н,\ \delta_Б = Б_д - Б_н\ , \qquad (1.1)$$

то погрешность их увязки $C_{A\text{-}Б}$ характеризуется разностью погрешностей их изготовления:

$$C_{A\text{-}Б} = \delta_A - \delta_Б \qquad (1.2)$$

Расчет точности сборки часто производят с помощью аппарата теории размерных цепей [25, 53].

При оценке точности сборки достаточно ограничиться применением плоскопараллельных или скалярных размерных цепей. Размер замыкающего звена в этом случае определяется по уравнению размерной цепи

$$L_{ЗАМ} = \sum_{i=1}^{n} A_i L_i\ , \qquad (1.3)$$

где L_i составляющие звенья размерной цепи; A_i передаточное отношение, характеризующее влияние составляющих звеньев на замыкающее звено; A_i=1 для увеличивающих звеньев, с ростом которых увеличивается замыкающее звено; A_i=-1 для уменьшающих звеньев, с ростом которых уменьшается замыкающее звено.

Если составляющие звенья размерной цепи выполнены с производственными погрешностями Δ_i, то в силу замкнутости размерной цепи замыкающее звено получит производственную погрешность, определяемую уравнением производственной погрешности

$$\Delta_{ЗАМ} = \sum_{i=1}^{n} A_i \Delta_i\ . \qquad (1.4)$$

При расчетах точности сборки можно ограничиться без большой погрешности составлением этих уравнений, не составляя уравнений размерных цепей. При этом предполагается, что процесс переноса размеров как при изготовлении деталей, так и при сборке узла (агрегата) описывается полными размерными цепями. Решение уравнений производственных погрешностей (1.4) может быть выполнено расчетом по которому получают максимально возможные отклонения замыкающего звена. Более правильным является расчет, основанный на принципах теории вероятности. В этом случае решение уравнений погрешностей сводится к определению двух основных статистических характеристик погрешности замыкающего звена: Δ_Σ координаты центра группирования погрешностей сборки; δ_Σ среднеквадратичного отклонения или половины поля допуска замыкающего звена. Эти величины определяются по формулам

$$\Delta_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} \left(A_i \Delta_i + A_i \delta_i \alpha_i \right), \qquad (1.5)$$

$$\delta_\Sigma = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^{n} A_i^2 K_i^2 \delta_i^2}, \qquad (1.6)$$

где Δ_i координата середины поля допуска составляющего звена; δ_i - половина поля допуска составляющего звена; α_i коэффициент относительной асимметрии разделения составляющего звена; K_i коэффициент относительного рассеяния размера составляющего звена.

В случае нормального распределения (по закону Гаусса) α_i и K_i соответственно равны 0 и 1. Для других видов распределения α_i и K_i определяют экспериментально.

Координата середины поля допуска составляющего звена

$$\Delta_i = \frac{BO_i + HO_i}{2}, \qquad (1.7)$$

где BO_i - верхнее и HO_i - нижнее предельные отклонения.

При симметричном расположении допуска Δ_i=0. Половина поля допуска

$$\delta_i = \frac{BO_i - HO_i}{2}. \qquad (1.8)$$

Предельные отклонения замыкающего размера (размера собранного изделия) будут

$$BO_\Sigma = \Delta_\Sigma + \delta_\Sigma, \qquad (1.9)$$

$$HO_\Sigma = \Delta_\Sigma - \delta_\Sigma. \qquad (1.10)$$

Полученные при расчетах отклонения не должны превышать отклонений, заданных техническими условиями на изделие. Если на чертеже узла или агрегата нет конкретных указаний о точности

(допусках) готового изделия, можно ориентироваться на данные, приведенные в табл.1.1.

Производственные погрешности. Погрешности, определяющие точность выполнения собираемых изделий, можно разделить на три основные группы (табл.1.3)

Таблица 1.3.

Виды производственных погрешностей

Группа	Вид погрешности	Принятое обозначение
Погрешности изготовления рабочего носителя размера	Погрешность изготовления базовой детали	$\delta_{БАЗ}$
	Погрешность изготовления приспособления для сборки	$\delta_{ПР}$
Погрешность увязки	Погрешность взаимной увязки отверстий базовой и устанавливаемой деталей	$C_{СО(ДЕТ1-ДЕТ2)}$
	Погрешность взаимной увязки контуров базовой и устанавливаемой деталей	$C_{КОН(ДЕТ1-ДЕТ2)}$
	Погрешность взаимной увязки сборочных приспособлений	$C_{ПР(ОБЪЕКТ1-ОБЪЕКТ2)}$
	Погрешность увязки контура и сборочных отверстий детали	$C_{ДЕТ(КОН-СО)}$
	Погрешность увязки контура и координатно-фиксирующих отверстий детали	$C_{ДЕТ(КОН-КФО)}$
Погрешности, не зависящие от метода базирования	Погрешности, вызванные клепкой, сваркой	$\delta_{КЛ}$
	Погрешности, вызванные температурными изменениями	δ_t
	Погрешности, вызванные деформациями сборочных приспособлений	δ_f
	Погрешности, вызванные изменением толщины материала	δ_s

Статистические характеристики производственных погрешностей на разных этапах переноса размеров и величины коэффициентов α_i и K_i приведены в табл.1.4.

В соответствии с принятым технологическим процессом сборки изделия для полной технологической размерной цепи составляют уравнение производственной погрешности [4, 25].

Таблица 1.4.

Статистические величины погрешностей

Обозначение этапа	Технический процесс или метод переноса размера	Отклонения контура, мм	Отклонения между осями отверстий, мм	α_1	K_i
ТП-КП	Расчерчивание	0; -0,1	±0,05	0	1
КП-ОК	Фотопечать	±0,1	±0,05	0	1
ОК-ШК	Припиловка	0; -0,15	±0,1	0,5	1,4
ШК-ШВК	То же	0; +0,15	±0,1	0,5	1,4
ШК-ШРД	-"-	+0,3; 0	±0,1	0,5	1,4
ШРД-ШФ	-"-	0; -0,15	±0,1	0,5	1,4
ШФ-деталь	Фрезерование	±0,2	±0,2	0	1
ШК-ШОК	Припиловка	+0,2; 0	±0,15	0,5	1,4
КП-ШМФ	То же	+0,1; 0	±0,15	0,5	1,4
ШМФ-рубильник	-"-	±0,2	---	0,5	1,4
Рубильник-ПК	Слепок	±0,1	---	0,5	1,4
ШВК-формблок	Припиловка	±0,2	±0,15	0,5	1,4
КП-ШКС	То же	0; -0,2	±0,15	0,5	1,4
ШКС-КШКС	-"-	±0,2 0	---	0,5	1,4
КШСК-МП	-"-	-0,2 0	±0,15	0,5	1,4
ШОК-болванка	Пригонка	+0,2 0	±0,35	0,5	1,4
ПК/ИС-приспособление	Фиксация штырями	±0,1	±0,02	0	1
МЭ-приспособление	Фиксация штыри	±0,1 0	±0,1	0	1
Формблок-деталь	Штамповка резиной	+0,3 0	---	0	1
Болванка-деталь		+1,5 0,5	---	0,2	1,1
ШОК-деталь	Сверление	---	±0,2	0	1
ШКС-штамп	Пригонка	+0,3 0	±0,1	0,5	1,4
Штамп-деталь	Штамповка	±0,2 0	---	0,2	1,1
МП-КЭ	Слепок	+0,1 0	±0,1	0	1
КЭ-МЭ	То же	0; -0,1	±0,1	0	1
ШК-ШГП	Припиловка	±0,2	---	0,5	1,4
ШГП-пуансон	То же	±0,2	---	0,5	1,4
Пуансон-деталь	Гибка на ПГР	+0,5 0	---	0,2	1,2
Кондуктор-деталь	Сверление	---	±0,05	0	1
СЧПУ-шаблон	Механическая обработка	±0,1	±0,1	0	1
СЧПУ-рубильник	То же	±0,15	---	0	1
ШКС-копир	Припиловка	+0,2 0	---	0,5	1,4
Копир-обшивка	Штамповка-гибка	+1,5 0,5	---	0,2	1,1

Определяют по формулам (1.7), (1.8) и табл.1.4 величины α_i, Δ_i, δ_i и K_i. Затем по формулам (1.5), (1.6) находят Δ_Σ, δ_Σ, а по формулам (1.9), (1.10) - BO_Σ и HO_Σ.

Влияние метода базирования на точность сборочного процесса. Сборка с базированием по внешней поверхности обшивки ("от обшивки"). Точность выполнения аэродинамического контура агрегата в этом случае определяется уравнением

$$\delta_{сб}=\delta_{пр}+c_{кон(пр\text{-}дет)}+\delta_{кл}+\delta_f+\delta_t, \qquad (1.11)$$

где $\delta_{сб}$ погрешность готового агрегата; $\delta_{пр}$ погрешность сборочного приспособления; $c_{кон(пр\text{-}дет)}$ погрешность взаимной увязки контуров приспособления (например, рубильников) и устанавливаемой детали (например, обшивки); $\delta_{кл}$, δ_f, δ_t погрешности, вызываемые клепкой, деформацией приспособления, изменением температуры.

Принимая приближенно сумму последних равной 40% погрешности сборки, т.е.

$$\delta_{кл}+\delta_f+\delta_t=0{,}4\delta_{сб}, \qquad (1.12)$$

получим

$$0{,}6\delta_{сб}=\delta_{пр}+c_{кон(пр\text{-}дет)}. \qquad (1.13)$$

Погрешность увязки контуров приспособления и обшивки (зазор между рубильником и обшивкой) можно значительно уменьшить за счет установки специальных прижимов в приспособлениях. В этом случае формула для расчета $\delta_{сб}$ будет иметь вид

$$0{,}6\delta_{сб}=\delta_{пр}+c_{кон(пр\text{-}дет)}K_{приж}. \qquad (1.14)$$

Коэффициент прижима $K_{приж}$ характеризует компенсацию погрешности и определяется по табл.1.5.

Таблица 1.5.
Определение коэффициента прижим

Число прижимов	$l_{пр}/l_{дет}$	$K_{приж}$
3	0,50	0,60
4	0,33	0,50
5	0,25	0,25
7	0,18	0,20
8	0,15	0,10

Здесь $l_{пр}$ - расстояние между прижимами; $l_{дет}$ - длина детали.

Сборка с базой по поверхности каркаса. Для сборки узлов типа нервюр, шпангоутов, лонжеронов в приспособлениях следует пользоваться формулой (1.13), так как детали, образующие обвод, могут быть прижаты к контурным фиксаторам (ложементам) прижимами. При сборке агрегатов и секций с базой по поверхности каркаса уменьшить погрешности увязки $c_{кон(пр\text{-}дет)}$ за счет установки прижимов не представляется возможным. Кроме того, вносится дополнительная погрешность в толщине обшивки δ_s. Тогда формула (1.13) примет вид

$$0{,}6\delta_{сб}=\delta_{пр}+c_{кон(пр\text{-}дет)}+\delta_s. \qquad (1.15)$$

При сравнении формул (1.14) и (1.15) видно, что способ сборки по поверхности каркаса менее точен. Для повышения точности

обвода допускается компенсация путем правки каркаса или установки прокладок. В этом случае погрешность увязки должна быть принята равной $(0,5...0,6)c_{кон(пр-дет)}$.

Сборка по сборочным отверстиям. Для сборки стенки нервюры с двумя поясами (дет1, дет2) формула будет иметь вид

$$\delta_{сб}=\delta_{баз}+c_{дет1(кон-со)}+c_{дет2(кон-со)}+\delta_{кл}+2\delta_{фик}, \quad (1.16)$$

где $\delta_{баз}$ погрешность базовой детали (стенки); $c_{дет(кон-со)}$ - погрешность увязки контура и СО первого и второго пояса; $\delta_{кл}$ - погрешность от клепки; $\delta_{фик}$ погрешность фиксирования (зазор между отверстием и штырем-фиксатором).

Приняв

$$\delta_{кл}+2\delta_{фик}=0,3\delta_{сб},$$

получим

$$0,7\delta_{сб}=\delta_{баз}+c_{дет1(кон-со)}+c_{дет2(кон-со)}. \quad (1.17)$$

Компенсация в этом случае невозможна. При сборке агрегата из узлов, собранных по СО, надо добавлять погрешности от обшивок $2\delta_s$:

$$0,7\delta_{сб}=\delta_{баз}+c_{дет1(кон-со)}+c_{дет2(кон-со)}+2\delta_s. \quad (1.18)$$

Сборка по КФО. При этом методе сборка происходит в приспособлении, поэтому $\delta_{баз}=\delta_{пр}$. Приняв

$$\delta_{кл}+\delta_f+\delta_l+2\delta_{фик}=0,5\delta_{сб}, \quad (1.19)$$

получим общее уравнение в виде

$$0,5\delta_{сб}=\delta_{пр}+c_{дет1(кон-со)}+c_{дет2(кон-со)}+2\delta_s. \quad (1.20)$$

Следует отметить, что при выводе формул (1.15), (1.18), (1.20) принято допущение, что зазор между каркасом и обшивкой равен нулю.

Составление уравнений погрешности. Учет схемы увязки сборочной и заготовительной оснастки. При связанном изготовлении деталей происходит накопление погрешностей на всех этапах переноса размеров, начиная с первоисточника (обычно с теоретического плаза). Число и характер этих этапов зависит от принятой схемы увязки заготовительной и сборочной оснастки. Она записывается в форме так называемой структурной схемы увязки оснастки. Например, для макетно-инструментального (иначе координатно-шаблонного) метода увязки структурная схема запишется так:

ШМФ→Рубильник→ПК/ИС→Приспособление для сборки ТП-КП

ОК→ШК→Рабочий шаблон→Штамповая оснастка→Деталь.

Для эталонно-шаблонного метода она будет иметь вид:

ТП→КП→ШКС→КШКС→МП→КЭ → МЭагр→Стапель; МЭузла→Приспособление.

Для расчетно-плазового метода запишется так:

СЧПУ → ШМФ→Рубильник→ПК/ИС→Приспособление
СЧПУ → ШКС→Копир→Обшивка.

Для определения погрешности сборки узла, изготовления детали или приспособления необходимо суммировать все погрешности одной ветви, начиная от первоисточника. При определении погрешности увязки приспособления, деталей между собой или деталей с приспособлениями суммируются погрешности несвязанных этапов по обеим ветвям. Приняв по данным табл.1.4 значения погрешностей и записав их на стрелках, связывающих этапы, получим уравнение погрешностей. При сборке по СО и КФО необходимо показать как погрешности по контурам (выше стрелки), так и погрешности отклонения отверстий от контура (ниже стрелки).

Примеры расчета точности сборки. Пример 1. Заданный по ТУ допуск на отклонение фюзеляжа от теоретического контура $\delta_{сб}=\delta_{ТУ}=\pm$ 2 мм. Требуется определить допуск на контур шпангоута в том же сечении, а также ожидаемую точность его сборки. Допуск на узел определяется по формуле

$$\delta_{уз}=\delta_{ТУ}-c_{пр(агр\text{-}узел)}\,, \qquad (1.21)$$

где $c_{пр(агр\text{-}узел)}$ погрешность увязки сборочных приспособлений для сборки фюзеляжа и шпангоута.

Для расчета $c_{пр(агр\text{-}узел)}$ составляют структурную схему, приняв методом увязки макетно-инструментальный.

По табл.1.4 определяем погрешность на всех этапах переноса размеров при изготовлении сборочных приспособлений:

ТП $\xrightarrow{-0,1}$ КП $\xrightarrow{\pm 0,1}$ ШМФ $\xrightarrow{\pm 0,2}$ ложемент $\xrightarrow{\pm 0,1}$ ПК/ИС $\xrightarrow{\pm 0,2}$ приспособление для сборки шпангоута

ШМФ $\xrightarrow{\pm 0,2}$ рубильник $\xrightarrow{\pm 0,1}$ ПК/ИС $\xrightarrow{\pm 0,2}$ стапель для сборки фюзеляжа.

Для определения погрешности увязки берем только несвязанные этапы переноса размеров. Для них все допуски симметричные, поэтому координата середины поля допусков равна 0:

$$\Delta_{\Sigma}C_{пр(агр\text{-}узел)}=0\,.$$

Половину поля допусков определим по формуле (1.6):

$$\delta_{\Sigma}=C_{пр(агр-узел)}=\sqrt{4\cdot 0{,}2^2+2\cdot 0{,}1^2}=\pm 0{,}425 \text{ мм}.$$

Таким образом, допуск на сборку шпангоута будет

$$\delta_{уз}=\pm 2\pm 0{,}425=\pm 1{,}575 \text{ мм}.$$

Ожидаемую точность сборки шпангоута определим по формуле (1.14)

$$0{,}6\delta_{сб}=\delta_{пр}+2c_{кон(пр\text{-}дет)}K_{приж}\,.$$

Составим структурную схему, где в верхней ветви отразим все этапы переноса размеров при изготовлении приспособления для сборки шпангоута, в нижней - при изготовлении профиля шпангоута:

$$\text{ТП}\xrightarrow{-0,1}\text{КП}\begin{cases}\xrightarrow{\pm 0,1}\text{ШМФ}\xrightarrow{\pm 0,2}\text{ложемент}\xrightarrow{\pm 0,1}\text{ПК/ИС}\xrightarrow{\pm 0,2}\text{приспособление}\\ \xrightarrow{\pm 0,1}\text{ОК}\xrightarrow{-0,15}\text{ШК}\xrightarrow{+0,2}\text{ШГП}\xrightarrow{\pm 0,2}\text{пуансон}\xrightarrow{+0,5}\text{профиль}.\end{cases}$$

Для определения $\delta_{пр}$ и $c_{кон(пр\text{-}дет)}$ составим табл.1.6. По формулам (1.5) и (1.6) определим середину и половину поля допусков для сборочного приспособления, для чего берем все этапы переноса размеров при его изготовлении (верхняя ветвь):

$$\Delta_{\Sigma\delta_{пр}} = (-0{,}05+0{,}05+0{,}025+3\cdot 0{,}1) = 0{,}325 \text{ мм};$$

$$\delta_{\Sigma\delta_{пр}} = \sqrt{(0{,}25+0{,}49+1{,}96+5{,}6\cdot 2)10^{-2}} = \pm 0{,}36 \text{ мм}.$$

Таблица 1.6.

Расчет точности сборки

Этап	Отклонение, мм		δ_i, мм	A_i	Δ_i, мм	α_i	K_i	$\Delta_i A_i$ мм	$A_i\delta_i\alpha_i$, мм	$A_i^2\delta_i^2K_i^2$, мм²х10⁻²
ТП-КП	-0,1	0	0,05	1	-0,05	0	1	-0,05	0	0,25
КП-ОК	-0,1	0,1	0,1	1	0	0	1	0	0	1
ОК-ШК	-0,15	0	0,075	1	-0,075	0,5	1,4	-0,075	0,0375	1,1
ШК-ШГП	0	0,2	0,1	1	+0,1	0,5	1,4	+0,1	0,05	1,96
ШГП-пуансон	-0,2	0,2	0,2	1	0	0,5	1,4	0	0,1	5,6
Пуансон-профиль	0	0,5	0,25	1	+0,25	0,2	1,2	+0,125	0,05	9
КП-ШМФ	0	0,1	0,05	1	+0,05	0,5	1,4	+0,05	0,025	0,46
ШМФ-ложемент	-0,2	0,2	0,2	1	0	0,5	1,4	0	0,1	1,96
Ложемент-ПК	-0,1	0,1	0,1	1	0	0,5	1,4	0	0,1	5,6
ПК/ИС-приспособление	-0,2	0,2	0,2	1	0	0,5	1,4	0	0,1	5,6

Таким образом, погрешность изготовления приспособления будет

$\delta_{пр}$=(0,325±0,36) мм.

Определим погрешность увязки $c_{кон(пр\text{-}дет)}$, для чего берем все несвязанные этапы:

$$\Delta_{\Sigma C кон(пр\text{-}дет)} = (-0{,}075+0{,}25+0{,}05+0{,}05+3\cdot 0{,}1+0{,}0375+0{,}025) = 0{,}637 \text{ мм}.$$

$$\delta_{\Sigma c_{кон(пр\text{-}дет)}} = \sqrt{(1+1{,}1+2\cdot 1{,}96+3\cdot 5{,}6+0{,}49+9)\cdot 10^{-2}} = \pm 0{,}568 \text{ мм}.$$

Таким образом, погрешность увязки будет $c_{кон(пр\text{-}дет)}$= =(0,637±0,568) мм.

Определим точность сборки шпангоута по формуле (1.14). Примем коэффициент прижима $K_{приж}$ равным 0,1 (8 прижимов по длине профиля), тогда

$$\delta_{шп} = \frac{(0{,}325 \pm 0{,}36) + 0{,}1(0{,}637 \pm 0{,}568)}{0{,}6} = (0{,}66 \pm 0{,}68) \text{ мм}.$$

Допуск на контур шпангоута равен ±1,575 мм.

Пример 2. Определить погрешность сборки фюзеляжа с базой на наружный контур обшивки. Метод увязки - расчетно-плазовый. Воспользуемся формулой (1.14). Для определения $\delta_{пр}$ и $c_{кон(пр\text{-}дет)}$ составим структурную схему:

СЧПУ → ШМФ→рубильник→ПК/ИК→приспособление
СЧПУ → рабочий шаблон→штамповая оснастка→деталь.

Определив из табл.1.4 погрешность всех этапов переноса размеров, составляем табл.1.6 и рассчитываем $\delta_{пр}$, $c_{кон(пр\text{-}дет)}$,а затем и $\delta_{сб}$.

Пример 3. Определить погрешность сборки триммера с базой на контур каркаса. Метод увязки расчетно-плазовый, рубильники стапеля и формблок изготавливаются непосредственно на СЧПУ. Точность сборки определяется по формуле (1.14).

Для расчета $\delta_{пр}$ и $c_{кон(пр\text{-}дет)}$ составляем структурную схему:

СЧПУ → рубильник→ИС→приспособление
СЧПУ → формблок→нервюра.

Погрешностью выполнения фиксирующих отверстий в рубильниках стапеля на координатно-расточных станках можно пренебречь. Определив погрешность всех этапов переноса размеров, можно найти $\delta_{пр}$ и $c_{кон(пр\text{-}дет)}$, а затем и $\delta_{сб}$. Коэффициент правки $K_{пр}$ можно принять равным 0,5...0,6. Погрешность по толщине обшивки δ_s = (0,1…0,5) мм.

1.6. Оценка экономической эффективности процессов сборки

Общеизвестно, что одним из основных показателей экономической эффективности выпускаемой продукции является её технологическая себестоимость [53]. По сравнению с другими составляющими себестоимости технологическая себестоимость существенно изменяется при переходе от одного процесса изготовления к другому. Поэтому при сравнительном экономическом

анализе рассматривают не всю себестоимость изготавливаемой продукции, а только технологическую.

Технологическая себестоимость это часть себестоимости, включающая расходы, которые могут существенно изменяться с изменением технологического процесса.

Обычно в технологическую себестоимость C_T любого производства включают следующие составляющие:

а) расходы на заготовку $P_з$;

б) зарплату производственных рабочих $З_{пр}$;

в) расходы по эксплуатации оборудования $О$;

г) расходы на амортизацию P_A;

д) расходы на приспособления $П$;

е) расходы на инструмент $И$.

В соответствии с этим технологическую себестоимость выполнения операции определяют по следующей формуле:

$$C_T=P_З+З_{пр}+О+P_A+П+И\,. \qquad (1.22)$$

Расходы на заготовку в свою очередь можно определить по формуле:

$$P_З=k_M B_M Ц_M - B_{ОТ} Ц_{ОТ}\,, \qquad (1.23)$$

Здесь k_M - коэффициент, учитывающий расходы по транспортировке материала на предприятие; B_M масса заготовки, кг; $Ц_M$ цена единицы массы заготовки, руб./кг; $B_{ОТ}$ - масса отходов, кг; $Ц_{ОТ}$ - цена единицы массы отходов, руб./кг.

Зарплата производственных рабочих

$$З=З_c t_{шк} k_1 k_2 k_3\,, \qquad (1.24)$$

где $З_c$ часовая тарифная ставка рабочего, руб./чел.-ч; $t_{шк}$ штучно-калькуляционное время, ч; k_1 коэффициент, учитывающий влияние бригадного или многостаночного обслуживания; k_2 коэффициент приработка рабочего, учитывающий разницу между фактическим и тарифным часовым заработком вследствие перевыполнения норм; k_3 - коэффициент, учитывающий дополнительную зарплату и начисления в фонд соцстраха.

Коэффициент k_1 учитывает возможность работы на сложных станках двух и более рабочих и возможность многостаночного обслуживания, когда один рабочий обслуживает несколько станков. В общем случае k_1 определяют как

$$k_1=P_{пр}/Q\,, \qquad (1.25)$$

где $P_{пр}$ и Q соответственно число рабочих и обслуживаемых ими станков.

При работе на автоматах и полуавтоматах расходы на зарплату наладчиков определяются по формуле (1.24) с учетом другого числа станков, приходящегося на одного наладчика.

Наладка других станков обычно осуществляется самими рабочими, и затраты времени на наладку уже учтены в $t_{шк}$. Если же

наладка выполняется специально выделенными наладчиками, то из подготовительно-заключительного времени выделяют время наладки, а расходы на наладку определяют по формуле:

$$H=T_H З_c k_2 k_3 / n \,, \qquad (1.26)$$

где T_H продолжительность наладки оборудования; $З_c$ - тарифная ставка наладчика; n число деталей в партии, обрабатываемой за одну наладку.

Расходы по эксплуатации оборудования O состоят из расходов на ремонт и модернизацию P_M, а также расходов на энергию Э.

Расходы на ремонт и модернизацию P_M определяют по формуле:

$$P_M = \frac{Г_{рс} p k_Э}{Ц_{рс}} \frac{t_{шк}}{k_H} \,, \qquad (1.27)$$

где $Г_{рс}$ группа ремонтной сложности оборудования; p - расходы на все виды ремонтных работ за период ремонтного цикла для единицы группы ремонтной сложности, руб.; $Ц_{рс}$ ремонтный цикл, т.е. фондовое время между двумя капитальными ремонтами, ч; $k_Э$ коэффициент, учитывающий затраты на ремонт и осмотр электрооборудования станка; k_H - коэффициент выполнения норм.

Расходы на электроэнергию Э могут быть определены по формуле

$$Э = k_N k_П N_y C_{эл} t_M \,, \qquad (1.28)$$

где k_N коэффициент загрузки станка по мощности, определяемый отношением мощности, затрачиваемой на полезную работу и на потери в механизмах станка, к установленной мощности; $k_П$ коэффициент потерь электроэнергии, учитывающий потери энергии в сети завода, а также на холостой ход станка; N_y установленная мощность электродвигателей станка, кВт; $C_{эл}$ цена единицы электроэнергии, руб./кВт.ч; t_M - машинное время, ч.

Расходы на амортизацию оборудования P_A возникают вследствие износа оборудования в процессе работы. Кроме того, происходит моральный износ, характеризующий отставание оборудования по техническому совершенству и экономическим показателям от новых моделей. Экономическое возмещение износа оборудования путем постепенного перенесения его стоимости на каждую единицу вырабатываемой продукции называется амортизацией оборудования.

Для универсального оборудования расходы по амортизации на одну операцию определяют по формуле

$$P_{AO} = \frac{\left(C_ф - Л\right)a}{k_з Ф \cdot 100} \frac{t_{шк}}{k_H}, \qquad (1.29)$$

где $C_ф$ стоимость оборудования с учетом его доставки и монтажа, руб.; $Л$ - остаточная стоимость оборудования (стоимость лома), руб.; a норма годовых амортизационных отчислений, %; $k_з$ коэффициент загрузки оборудования, т.е. отношение времени, в течение которого оборудование занято работой, к фонду времени его работы. Он учитывает внеплановые простои станка по техническим или организационным причинам, например, вследствие несвоевременного поступления заготовок на рабочее место; $Ф$ годовой фонд времени работы оборудования, т.е. времени, в течение которого оборудование может быть использовано для работы, ч. Величина его определяется произведением числа рабочих дней в году на число смен работы предприятия и на длительность смены в часах за вычетом времени, в течение которого оборудование находится в капитальном ремонте.

Специальное оборудование предназначено для изготовления одной детали. Оно находится в эксплуатации, пока не сменится объект производства. При этом амортизационные расходы для универсальных деталей и узлов рассчитываются так же, как для универсального оборудования, т.е. по формуле (1.29). Расходы по амортизации специальных частей оборудования, которые не могут быть использованы в новых компоновках, а также расходы по сборке оборудования равномерно разносятся на все детали, изготовленные с помощью специального оборудования:

$$P_c = P' + P'', \qquad (1.30)$$

где P' амортизационные расходы на универсальные части оборудования; P'' амортизационные расходы на специальные части, а также на сборку оборудования

$$P'' = C_ф''/N, \qquad (1.31)$$

где $C_ф''$ - стоимость специальных частей оборудования и его сборки; N общее число деталей, подлежащих изготовлению на специальном станке за время выпуска машины.

Расходы на приспособления $П$ зависят от типа приспособлений. Расходы на универсальное приспособление $П_у$ включают цену покупного приспособления (или себестоимость приспособления собственного производства) и расходы на ремонт. Эти расходы равномерно распределяются на весь период нахождения приспособления в эксплуатации, и доля их, приходящаяся на каждую изготовленную с их помощью заготовку, зависит от времени, в течение которого приспособление занято изготовлением данной детали:

$$П_у = \frac{C_{п\,у} + P_П}{k_B T_и} \frac{t_{шк}}{k_H}, \qquad (1.32)$$

где $C_{пу}$ цена универсального(покупного) приспособления или себестоимость приспособления своего производства; $P_П$ - расходы на ремонт приспособления за время его эксплуатации; $T_и$ - срок службы приспособления до полного износа; k_B коэффициент использования приспособления, учитывающий неполное использование приспособления во времени.

Расходы на специальное приспособление $П_c$ определяют по формуле

$$П_c = \frac{C_{пс} - Л - P_П}{N}, \qquad (1.33)$$

где $C_{пс}$ - цена или себестоимость специального приспособления; $Л$ - остаточная стоимость деталей приспособления, которые могут быть использованы для изготовления других приспособлений после снятия изделия с производства; N - число деталей, подлежащих изготовлению в данном приспособлении за время выпуска изделия.

Расходы по эксплуатации инструмента можно определить по формуле

$$И = \frac{C_и + P_и}{\alpha T_и (n+1)} T_{МАШ}, \qquad (1.34)$$

где $C_и$ - стоимость инструмента и $P_и$ - стоимость ремонта инструмента; $T_и$ стойкость инструмента между ремонтами, а также n - число допускаемых ремонтов инструмента; α - коэффициент, учитывающий действительную работу инструмента, его можно принять при двухсменной работе цеха равным 0,3...0,5.

Для сборочных процессов при практических расчетах обычно ограничиваются включением в технологическую себестоимость только расходов на заработную плату производственным рабочим $З_{пр}$; расходов на эксплуатацию оборудования и его амортизацию $О$; расходов на эксплуатацию приспособления $П$ и инструмента $И$. Стоимость основных и вспомогательных материалов можно не учитывать, так как она обычно не меняется при изменении технологического процесса сборки узлов: $С=З_{пр}+О+П+И$. В нескольких случаях в расчеты можно включать и другие элементы себестоимости (стоимость энергии, зарплату наладчиков и т.п.). Если же в сравниваемых вариантах техпроцессов некоторые статьи будут одинаковы, то их можно исключить при расчете технологической себестоимости.

Для сборки узла или агрегата может быть разработано несколько вариантов технологических процессов, из которых необходимо выбрать оптимальный. Варианты могут отличаться как методами базирования или схемой сборки, так и способами и средствами выполнения отдельных операций и переходов. Для правильного выбора оптимальной схемы технологического процесса необходимо провести экономическое сравнение возможных его вариантов. Сравнение ведется по технологической себестоимости, по

её изменяющимся статьям. Порядок расчетов при сравнении вариантов по технологической себестоимости следующий.

1. Рассчитываются затраты по каждой составляющей технологической себестоимости для каждого варианта.
2. Определяются текущие затраты на каждое изделие:

$$A=З_{пр}+О_у+П_у+И_у ,$$

где $О_у$, $П_у$, $И_у$ затраты на универсальное оборудование, приспособление и инструмент.

3. Определяются единовременные затраты для каждого варианта:

$$Б=О_с+П_с+И_с ,$$

где $О_с$, $П_с$, $И_с$ затраты на спецоборудование, приспособление и инструменты.

4. Определяется технологическая себестоимость одного изделия:

$$С_Т=A+Б/N ,$$

где N -годовая программа или суммарные расходы на годовую программу выпуска изделий,

$$С_{Тгод}=A\cdot N+Б . \qquad (1.35)$$

5. Построив график $C=f(N)$ (рис.1.13), определяют оптимальный вариант технологического процесса для данного масштаба производства.

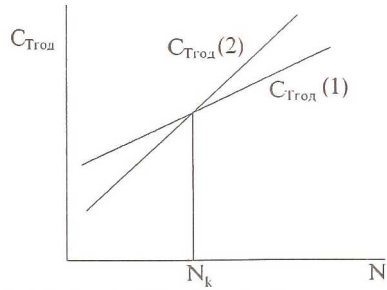


Рис.1.13. Сравнение вариантов технологического процесса сборки

Формула (1.35), представляющая уравнение прямой, характеризует затраты для данного технологического процесса.

В точке N_k, соответствующей годовой программе, где прямые $С_{Тгод}(1)$ и $С_{Тгод}(2)$ пересекаются, годовые расходы по обоим вариантам технологического процесса одинаковы. Если годовая программа $N<N_k$, то предпочтение должно быть отдано второму варианту технологического процесса. При $N>N_k$ необходимо остановиться на первом варианте технологического процесса. Программа может быть определена и аналитическим путем по формуле:

$$N_k=\frac{Б_2-Б_1}{A_1-A_2} .$$

Рассмотрим подробнее расходы на составляющие статьи технологической себестоимости в соответствии с методикой, предложенной в пособии [25, 50].

Расходы на заработную плату производственных рабочих состоят из заработка по тарифной сетке и начислений по соцстраху. Они могут быть определены по формуле $З_{пр}=С_р t_{шк}\eta_з$, где $С_р$

тарифная ставка; $t_{шк}$ - штучно-калькуляционное время; $\eta_з$ - коэффициент, учитывающий дополнительную заработную плату и начисления в фондсоцстраха. Тарифная ставка $C_р$ определяется по действующим тарифным сеткам в соответствии с разрядом работы, штучно-калькуляционное время определяется нормированием времени выполнения операций по разработанному технологическому процессу. Коэффициент $\eta_з$, учитывающий дополнительную зарплату (оплата отпусков, начисления по соцстраху и др.), принимают равным от 1,13 до 1,18.

Расходы по эксплуатации оборудования и его амортизации можно определить по формуле $О = О_{эк} + Э + Р_а$, где $О_{эк}$ расходы, связанные с эксплуатацией оборудования; $Э$ расходы на потребляемую энергию (электроэнергия, сжатый воздух); $Р_а$ расходы, связанные с годовыми амортизационными отчислениями.

Значения входящих величин приближенно можно определить по следующим формулам:

$$О_{эк}=0,18C_{об}/N\ ,\quad Э=W_{уст}(0,25T_{хх}+T_{маш})C_{эл}\ ,\quad Р_а=К_0а_0\ ,$$

где $C_{об}$ стоимость оборудования; N годовая программа выпуска; $W_{уст}$ мощность электродвигателей оборудования в кВт; $T_{хх}$ время холостого хода; $T_{маш}$ машинное время; $C_{эл}$ стоимость 1 кВт промышленной электроэнергии; $К_0$ капиталовложения в оборудование; $а_0$ - годовая норма амортизационных отчислений.

Стоимость оборудования $C_{об}$ определяется по каталогам оборудования или по таблицам приложения [50].

Капитальные вложения в оборудование определяются по формуле:

$$К_0=C_{об}Q\ ,$$

где Q - число единиц оборудования.

Годовая норма амортизационных отчислений может быть принята для клепальных процессов равной 8%, для специальных станков и установок 10%.

Сверлильно-клепальное оборудование является специализированным оборудованием, на котором изготавливается целая группа сборочных узлов, поэтому при определении расходов по эксплуатации оборудования и его амортизации, связанных с изготовлением данного узла, необходимо общие годовые расходы умножить на коэффициент $К_з$, характеризующий, какая доля годового фонда времени работы оборудования связана с изготовлением данного узла:

$$К_з = \frac{t_{шк}N}{Ф_0k}\ ,$$

где Φ_0 - годовой фонд времени работы оборудования; k -коэффициент загрузок оборудования, для мелкосерийного производства он равен 0,7, для крупносерийного 0,8...0,85.

Расходы по эксплуатации приспособлений определяются по формулам (1.32) и (1.33).

Расходы по эксплуатации инструмента можно определить по формуле (1.34), где n число допускаемых ремонтов инструмента, находится из [50].

1.7. Испытания и контроль в производстве летательных аппаратов

В производстве ЛА большое место занимают процессы испытания и контроля, целью которых является обеспечение высокой надежности ЛА, способность выполнять в полном объеме заданные функции.

В настоящее время трудоемкость испытательных и контрольных процессов составляет порядка 20% от общей трудоемкости изготовления ЛА и постоянно возрастает [36, 71].

Контроль и испытания проводятся на всех этапах изготовления ЛА, начиная с контроля исходных свойств материалов, поставок и кончая запуском.

Под испытаниями понимается экспериментальное определение значений параметров и показателей качества продукции в процессе функционирования или при имитации условий эксплуатации, а также при воспроизведении воздействия на продукцию по заданной программе.

Под контролем понимается проверка соответствия изделия установленным техническим требованиям, проверка количественных и качественных характеристик свойств продукции.

Одним из важнейших признаков любых испытаний является принятие на основе их результатов определенных решений. Другим признаком испытаний является задание определенных условий испытаний (реальных или модельных), под которыми понимается совокупность воздействий на объект и режимов функционирования объекта.

Характеристики объекта при испытаниях могут определяться как в процессе функционирования объекта, так и при отсутствии функционирования при наличии воздействий до и после их приложения.

Испытания и контроль проводятся на всех стадиях создания ЛА, начиная с разработки конструкции, изготовления и поставки готовых изделий и заканчивая её запуском.

Для обеспечения выпуска изделий система испытаний построена таким образом, что после изготовления в одинаковых

условиях партии изделий их надежность оценивается при испытаниях с предельными нагрузками на испытательных (контрольных) образцах из числа этих изделий.

Готовность остальных изделий к полету оценивается в ходе специальных приемочных испытаний с нагрузками, близкими к эксплуатационным. Таким образом, в основе системы испытаний лежит принцип аналогии летных образцов изделий с контрольными, который обеспечивается одинаковостью не только конструкции, но и технологии изготовления и контрольно-технологических испытаний.

Результаты усиленных испытаний контрольных образцов изделий переносятся на летные образцы, которые этих испытаний не проходили, что позволяет сохранить их ресурс работы.

Испытания принято классифицировать по категориям, видам и методам, а контроль - по видам и методам.

Категория испытаний - это группа испытаний, характеризуемая одинаковыми организационными признаками их проведения и принятия решений по результатам оценки объекта испытаний в целом. Опытному и серийному производствам соответствуют различные категории испытаний (рис.1.14).

Рис.1.14. Виды испытаний в условиях опытного и серийного производства

Целью **отработочных испытаний** в условиях опытного производства является отработка конструкции ЛА и технологических процессов его изготовления, а также проверка соответствия всех параметров и характеристик заданным в техническом задании (ТЗ). При автономных отработочных испытаниях объектом испытания являются узлы и агрегаты ЛА, а при комплексных испытаниях ЛА в сборке. Автономные испытания состоят из трех этапов - конструкторские, доводочные и чистовые.

Определение объема, программы и технологии испытаний является достаточно сложной задачей, решаемой в каждом конкретном случае. Несмотря на значительные отличия испытаний различных сборочных единиц и изделия в целом, они составляют определенную систему, состоящую из отдельных, логически

увязанных между собой этапов, выполняемых по специальным программам при проектировании, изготовлении и эксплуатации ЛА.

При проведении **конструкторских испытаний** проверяется правильность выбранной схемы агрегатов, узлов и отсеков ЛА и соответствие их характеристик ТЗ. **Доводочные испытания** проводятся для подтверждения работоспособности выбранной конструкции. На этом этапе допускается изменение конструкции элементов изделия и уточняется технологический процесс испытаний. **Чистовые** проводятся для подтверждения необходимой работоспособности сборочной единицы в соответствии с корректировкой по результатам конструкторских и доводочных испытаний. Комплексные испытания КА проводятся с целью отработки функционирования всего комплекса систем, узлов, агрегатов и отсеков и определения соответствия эксплуатационно-технических характеристик ЛА заданным в ТЗ.

Отработочные испытания проводятся как на опытном производстве ОКБ, так и на заводе-изготовителе.

После освоения в производстве технологии изготовления узлов, агрегатов, элементов автоматики и др. выполняются контрольно-технологические испытания, включая испытания установочной партии, приемо-сдаточные, контрольно-выборочные, периодические и типовые испытания.

Испытания установочной партии проводятся при постановке в производство новых изделий для небольших партий (3...5) испытываемых объектов одного наименования, изготовленных по разработанной технологии и прошедших обычные приемные испытания. Программа испытаний установочной партии для РН включает в себя испытания на прочность, герметичность, вибро- и ударные испытания, испытания на функционирование, циклические испытания на повторную нагрузку, определение фактического давления разрушения и т.д.

При положительных результатах испытаний установочной партии дается решение на производство штатных сборочных единиц изделия.

Приемо-сдаточные испытания проводятся для всех изготавливаемых деталей, сборочных единиц и изделия в целом в целях проверки соответствия их техническим условиям. Программы испытаний составляются для каждой изготавливаемой сборочной единицы и изделия и могут включать в себя следующие виды контроля и испытаний: контроль выходных геометрических параметров, определение массы, центра масс, прочностные испытания, контроль герметичности, определение объемов и невырабатываемых остатков топлива в емкостях, проверку функционирования, контроль чистоты внутренних полостей, контроль бортовых кабельных сетей и т.д.

Полностью собранные изделия проходят заводские приемо-сдаточные испытания на специальном испытательном участке (контрольно-испытательная станция - КИС).

Контрольно-выборочные испытания осуществляются в целях периодического контроля стабильности технологического процесса и качества сборочных единиц и изделия в целом. Эти испытания проводятся выборочно для небольшого (до 10%) количества узлов от каждой предъявляемой партии. В случае неудовлетворительных результатов испытаний их выполняют повторно на удвоенном количестве узлов (изделий).

При неудовлетворительных результатах испытания партия предъявленных узлов (изделий) бракуется. Изготовление и предъявление новой партии узлов (изделий) возможны лишь после выявления и устранения причин возникновения брака.

В отличие от приемо-сдаточных испытаний контрольно-выборочные испытания проводятся на предельных нагрузках и режимах.

При определенном перерыве в изготовлении рассматриваемых изделий и в ряде других случаев, предусмотренных технической документацией, проводятся периодические испытания, а при корректировке конструкторско-технологической документации - типовые.

Типовые испытания проводятся в случае внесения изменений в конструкцию или в технологию изготовления агрегата, узла, системы или отсека КА, которые могут повлиять на их характеристики, с целью оценки эффективности и целесообразности этих изменений.

Периодические испытания проводятся с целью контроля стабильности технологического процесса изготовления сборочных единиц ЛА и подтверждения возможности продолжения их изготовления. Периодические испытания должны проводиться не реже 1 раза в год на сборочных единицах от любой партии, принятой по контрольно-выборочным испытаниям в течение данного года.

Основными документами для проведения испытаний являются "Программа и методика испытаний" и для категорий испытаний, проводящихся на этапе серийного производства "Технические условия". В них устанавливаются объект и цели испытаний, виды, последовательность и объем проводимых экспериментов, порядок, условия, места и сроки проведения испытаний, их обеспечение и отчетность по ним. В этих документах указаны метод испытаний, средства испытаний, требования техники безопасности и охраны окружающей среды.

Виды испытаний это классификационная группа испытаний по определенному признаку, в первую очередь по проверяемому параметру и характеру воздействия. При этом различные виды испытания проводятся в рамках тех или иных категорий. Метод

испытания характеризуется применением определенных принципов и средств испытаний.

Вид испытания часто определяется местом его проведения, масштабом интервала времени, а также воздействием соответствующих факторов, проверяемыми параметрами.

Испытания, характеризуемые местом испытания, можно подразделить на **лабораторные, стендовые, полигонные и натурные**.

Испытания, характеризуемые масштабом времени, подразделяют на **нормальные**, проведение которых обеспечивает получение необходимого объема информации о характеристике и свойствах объекта во времени, предусмотренном условиями эксплуатации, и **ускоренные** - испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимой информации о характеристике и свойствах объекта в более короткий срок, чем при нормальных испытаниях.

Испытания, характеризуемые воздействующими факторами, подразделяются на механические, климатические, термические, радиационные, электромагнитные, электрические, магнитные, химические, биологические, неразрушающие и разрушающие.

Испытания, характеризуемые проверяемыми параметрами, подразделяют на **испытания на устойчивость**, проведение которых контролирует способность изделия выполнять свои функции и сохранять значения параметров в пределах установленных норм во время действия на него определенных факторов, и **испытания на прочность** испытания, проводимые для определения значений воздействующих факторов, вызывающих выход значений характеристик объекта за установленные пределы или его разрушение.

Следует отметить, что система контроля и испытаний ЛА строится исходя из определенных принципов, учитывающих специфику их конструкции, условия эксплуатации, условия производства, стоимость и т.д.

Все испытания должны обеспечивать достаточную информацию и выпуск аппарата с требуемой надежностью и должны проводиться на аппаратах, изготовленных по принятым для данного аппарата технологии и контролю. Контроль и испытания должны быть построены таким образом, чтобы имеющиеся дефекты выявились на более ранних этапах изготовления, на более низких уровнях сборки. Операции контроля и испытаний целесообразно располагать возможно ближе к тем сборочным операциям, где могут возникать ожидаемые дефекты.

Программа должна содержать испытания на все виды нагрузок, которым аппарат подвергается при наземной подготовке и в полете. Ряд воздействующих факторов (вакуум, невесомость, радиация) создается имитацией. В тех случаях, когда испытания

связаны с выработкой ресурса или опасностью повреждения испытуемого объекта, параллельно с летными по той же технологии изготавливаются специальные образцы для испытаний. Подобным испытаниям подвергаются как минимум два объекта: один предельным максимальным, разрушающим нагрузкам с целью определения запаса по данному типу нагрузки (например, запас прочности), а второй при почти эксплуатационных нагрузках в длительном режиме (до разрушения) для определения запаса по ресурсу.Все летные и испытательные образцы аппаратов проходят контрольно-технологические испытания по программе, составленной для летных образцов, после чего испытательные образцы поступают на испытания на предельные нагрузки. Уровень испытательных нагрузок должен обеспечивать необходимый запас по данному типу воздействия, но не слишком превышать реальные условия, так как отказы при завышенных условиях испытаний могут привести к ненужным переделкам конструкции, её утяжелению, проведению повторных испытаний. Длительность испытаний летных образцов строго регламентирована и должна быть минимальной. В некоторых случаях принимают длительность равной длительности одного цикла работы аппарата на земле и двух циклов работы его в полете.

Важным принципом испытаний является принцип подобия, когда предельные возможности конструкции определяются на испытательных образцах, а годность аппарата к полету определяется на рабочих образцах при нагрузках, равных эксплуатационным. Рабочие и испытательные образцы изготавливаются по одинаковой технологии.

Испытание на комплексное воздействие эксплуатационных факторов желательно проводить на полностью собранном ЛА, когда ранее выявленные дефекты устранены, а появившиеся новые дефекты - результат взаимного влияния отдельных элементов друг на друга. Такие испытания обязательно включаются в программу приемочных испытаний летных образцов. Результаты предыдущих испытаний должны учитываться при проведении испытаний более высокого уровня (не должно быть дублирования).

Испытания на функционирование и целостность коммуникаций бортовой аппаратуры и автоматики должны проводиться по принципу последовательно нарастающих повторных испытаний, что позволяет наиболее быстро выявить дефектные элементы. При выявлении дефектов все они должны анализироваться, устраняться, а объект испытаний должен пройти после этого повторные испытания в установленном объеме. Такие испытания по полной программе проводятся также в случае внесения принципиальных изменений в конструкцию, технологию или оборудование.

Испытания с целью сокращения их объема в необходимых случаях должны дополняться расчетами надежности посадочных агрегатов, например посадки на другие планеты.

Основными критериями эффективности контроля и испытаний являются надежность ЛА, стоимость, длительность цикла испытаний, что и должно учитываться в первую очередь при составлении программы испытаний и её оптимизации.

Все наземные испытания должны быть закончены до проведения летных.

Из партии изделий в целом, прошедшей заводские приемосдаточные испытания, одно изделие подвергается летным испытаниям. Для получения максимально возможной информации о работе систем ЛА (например, ракеты) в процессе полета она дооборудуется дополнительными датчиками (телеметрический вариант).

Летные испытания решающий этап отработки РН, после проведения которого окончательно определяют её основные характеристики:

- параметры траектории;
- углы тангажа, рысканья и крена РН и углы отклонения управляющих органов;
- параметры работы двигателей (давление в камерах, температуру газогенератора, температуру и давление в трубопроводах, подачу компонентов, частоту вращения турбины, частоту и амплитуду вибрации в разных точках двигателя и т.п.);
- давления наддува в баках и в магистральных трубопроводах;
- температуру компонентов топлива;
- значения продольных и поперечных перегрузок в различных зонах конструкции;
- параметры, характеризующие динамику разделения ступеней и отделяемых элементов конструкции, поведение компонентов в баках;
- температуру основных элементов конструкции;
- состояние и температуру газовой среды в отсеках;
- распределение давления по оболочке корпуса;
- взаимные перемещения и деформацию некоторых элементов конструкции и т.д.

При подготовке летных испытаний одной из основных задач является определение необходимого состава и числа измеряемых параметров, а также рациональное размещение датчиков и аппаратуры системы измерений. Реализация этой задачи начинается с этапа предварительных проработок выбранной компоновочной схемы, проводится на всех этапах разработки и основана на анализе предполагаемого функционирования систем и агрегатов РН на всех

этапах работы в штатных и аварийных ситуациях. Особое внимание обращают на аварийные ситуации, так как в процессе летной отработки вероятность появления таких ситуаций достаточно велика, а выявление и устранение их причин одна из главных задач летных испытаний. Моделируя функционирование РН, её систем и агрегатов на различных участках полета при штатных ситуациях, а также возможные аварийные ситуации, вероятные процессы их развития и работу систем и агрегатов РН в этих условиях, можно найти места установки датчиковой аппаратуры, диапазон измерений и перечень измеряемых параметров, позволяющих достаточно достоверно судить как о параметрах РН в целом, так и о процессах, протекающих на её борту во всех этих ситуациях. При соответствующей обработке результатов измерений удается прямо или косвенно установить:

- правильность расчетных случаев нагружения;
- правильность выбора динамической схемы;
- параметры реакции конструкции на внешние воздействия;
- частоту и форму собственных упругих колебаний и логарифмический декремент затухания;
- истинное положение центра давления;
- правильность описания динамической схемы системы РН ДУ;
- аэродинамическое сопротивление;
- достаточность органов управления и действующие возмущения и т.п.

Летные испытания, особенно при их неблагоприятном исходе, выявляют возможные доработки тех или иных элементов конструкции или систем РН, после реализации которых необходимы дополнительные огневые стендовые испытания, испытания на прочность и т.д., подтверждающие правильность принятых решений. В результате этих доработок возможно изменение выходных параметров РН, которые в процессе первых пусков, как правило, ухудшаются. Однако задачей летных испытаний является не только подтверждение правильности принятых решений и выявление слабых мест, но и определение запасов, заложенных на предшествующих этапах разработки, поэтому в ходе летных испытаний, накопления информации о фактических характеристиках РН и уточнения расчетных методов и схем появляется возможность уменьшения этих запасов и улучшения летных характеристик РН.

2. СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫЕ РАБОТЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

2.1. Применение сварки в производстве агрегатов летательных аппаратов

Производство современных ЛА невозможно без использования неразъемных соединений, получаемых различными способами сварки. По ряду важнейших конструктивно-технологических показателей сварные соединения имеют преимущества по сравнению с другими видами соединений (клепаными, клеевыми, резьбовыми и др.), применяемыми в производстве ЛА. Важнейшим преимуществом сварки является возможность получения герметичных и высокоресурсных соединений, работающих в условиях различных сред, в том числе в вакууме. Сварные соединения, особенно стыковые, как правило, имеют лучшие массо-габаритные характеристики. При изготовлении некоторых узлов и агрегатов ЛА (переходников, компенсаторов и т.п.) с помощью сварки можно получить соединения из разнородных материалов (алюминиевые сплавы со сталями, титановыми сплавами и металлокерамикой, керамика с керамикой, сталями, сплавами и т.д.).

Трудоемкость получения сварных соединений чаще ниже, чем клепаных, особенно при изготовлении дополнительных соединительных элементов (накладок, фитингов и т.п.), характерных для клепаных конструкций. Многие способы сварки, используемые в производстве ЛА, достаточно просто поддаются механизации, автоматизации и роботизации, что является важным критерием для надежности обеспечения качества соединений, а также повышения производительности процесса изготовления агрегатов.

Однако наряду с явными преимуществами по сравнению с другими видами соединений сварка имеет и свои недостатки. Во-первых, при сварке материалы конструкций должны иметь хорошую свариваемость. Во-вторых, возникают трудности при автоматизации процессов сварки для конструкций ЛА, имеющих сложную аэродинамическую форму (пассажирские, транспортные самолеты и т.п.).

Конструкция и технология изготовления сварных агрегатов во многом определяется типом и техническими характеристиками ЛА.

В РН основными агрегатами и их элементами, изготавливаемыми сваркой, являются (рис.2.1):

- баки для горючего и окислителя первой, второй и третьей ступеней;
- тоннельные и магистральные трубопроводы;
- арматура баков;

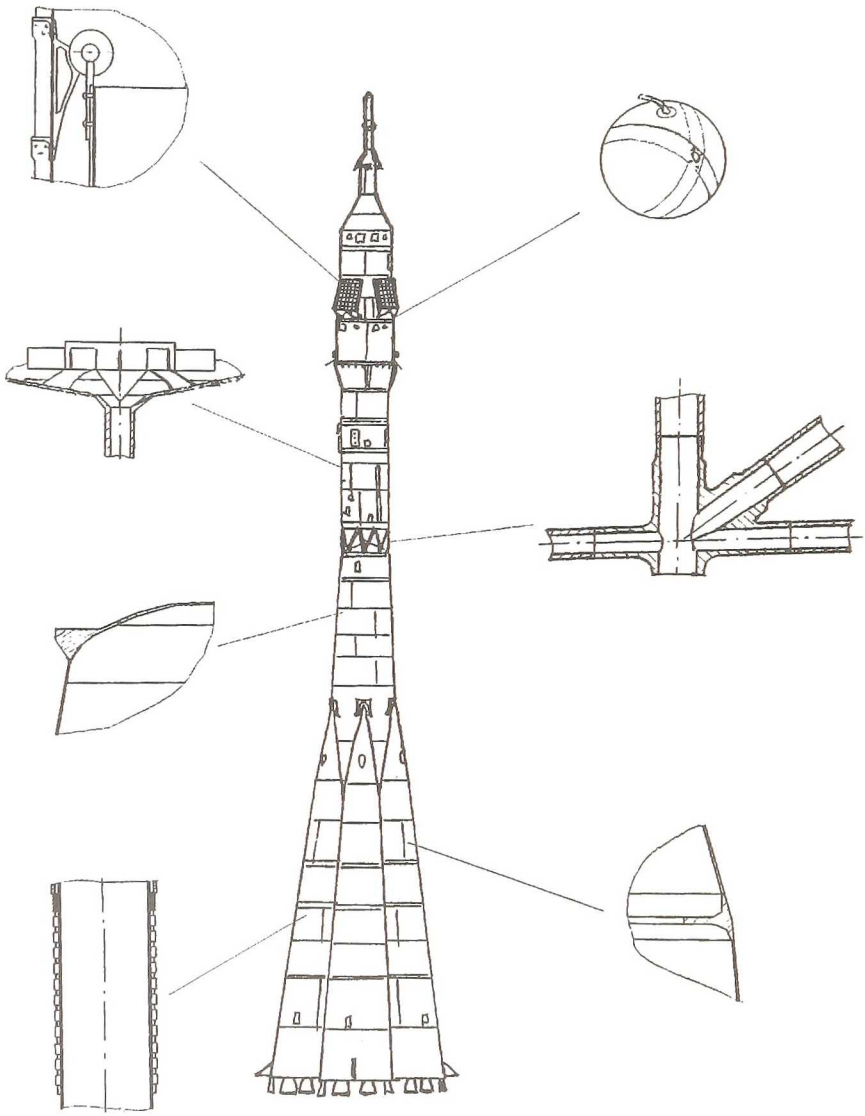


Рис.2.1. Основные сварные агрегаты и их элементы ракеты-носителя "Союз"

- ферменные конструкции переходных отсеков и устройств крепления маршевых двигателей;
- цилиндрические и шаровые баллоны для рабочих тел систем управления;

- элементы крепления приборов (кронштейны, фермы, рамы, этажерки и т.п.).

В этом случае основными способами сварки являются дуговая сварка (аргоно-дуговая неплавящимся электродом, импульсно-дуговая, ручная аргоно-дуговая и др.), контактная сварка (контактная точечная, шовная), в отдельных случаях сварка трением, лазерная сварка и др.

Конструктивно-технологические особенности космических систем многоразового использования "Шаттл" и "Энергия-Буран" потребовали разработки принципиально новых технологических решений и технологий гелиево-дуговой сварки, электронно-лучевой сварки, контактной сварки, в первую очередь для таких агрегатов, как центральный бак системы "Шаттл" и топливные отсеки РН "Энергия" или орбитальный корабль системы "Шаттл" (см. рис.2.1, 2.2). Например, в конструкции корабля "Шаттл" использованы наиболее передовые материалы и совершенные процессы получения неразъемных соединений, где основная роль при изготовлении крупногабаритных агрегатов принадлежит сварке. Сварка применяется при изготовлении командного модуля, силовой конструкции главных двигателей и более чем 40 емкостей, работающих под давлением. На рис.2.3 представлена конструктивная схема командного модуля. Длина модуля составляет порядка 5,2 м, а диаметр-5,5 м. Командный модуль представляет собой крупногабаритную алюминиевую конструкцию, имеет высокую надежность (корабль рассчитан на 400 запусков) при низком коэффициенте запаса прочности (1,4...1,5). Командный модуль собирается из 36 элементов, свариваемых между собой 36 швами общей длиной 119,86 м. Конструкция разработана с учетом возможности полной автоматизации процесса сварки. Ручная сварка используется только в случае выполнения ремонтных работ. В панелях, имеющих переменную толщину, имеются места плавного перехода, где в процессе сварки осуществляется программированное изменение параметров сварки. В целях повышения конструктивной прочности сварные швы отнесены в сторону от мест резких переломов контура конструкции. Например, как задний, так и передний замыкающие элементы в местах соединения их с конечной частью корпуса командного модуля имеют механически обрабатываемые переходные элементы типа шпангоутов, относящие место сварки порядка на 100 мм от места геометрического пересечения конуса с плоскостью замыкающих элементов. Для сборки-сварки агрегатов космических систем многоразового использования созданы уникальные технологические стенды и оснастка.

Технологические процессы сварки находят широкое применение при производстве ЛА типа искусственных спутников Земли, межпланетных станций, космических кораблей и орбитальных

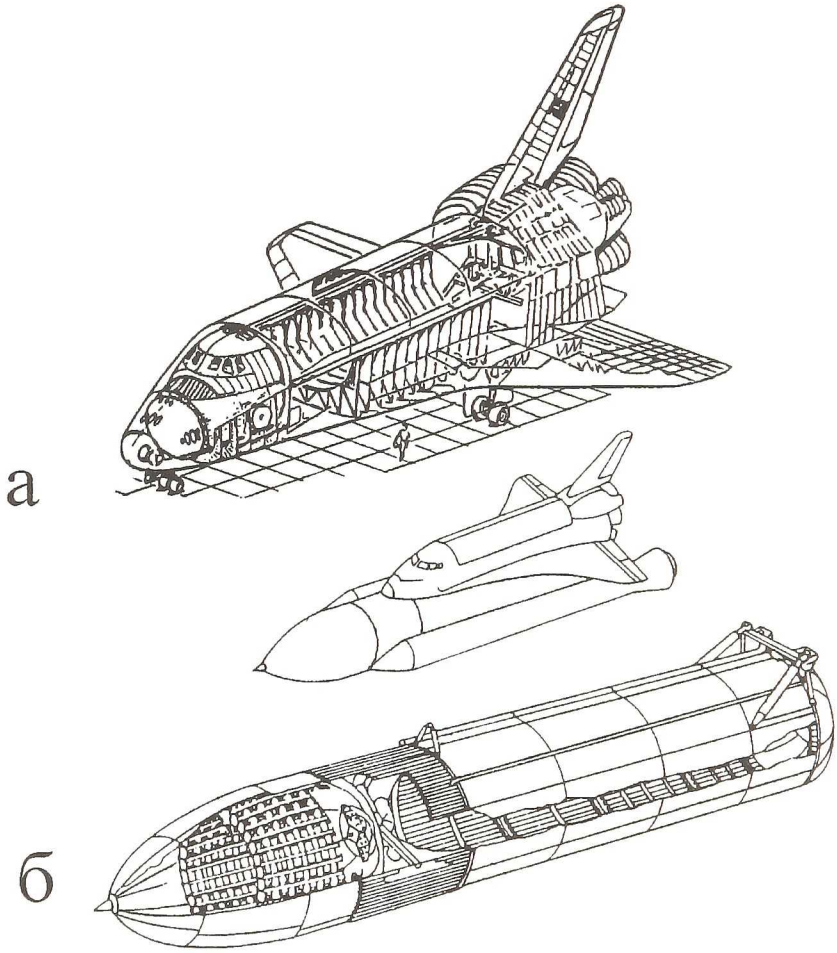


Рис.2.2. Основные сварные агрегаты орбитальной системы "Шаттл":
а - орбитальный корабль; б - центральный бак

станций (рис.2.4). Требования, предъявляемые к герметичным отсекам таких аппаратов, делятся на две группы [41, 71]:

- общие для отсеков любых аппаратов;
- специфические, вытекающие из условий эксплуатации конкретного аппарата.

Например, специфическими требованиями к герметичным корпусам долговременных орбитальных станций является обеспечение заданной жесткости на протяжении всего полета с целью сохранения постоянства взаимной ориентации системы координат станции

и вектора тяги двигателей. К общим требованиям можно отнести требования к точности, прочности и герметичности корпусов. За-

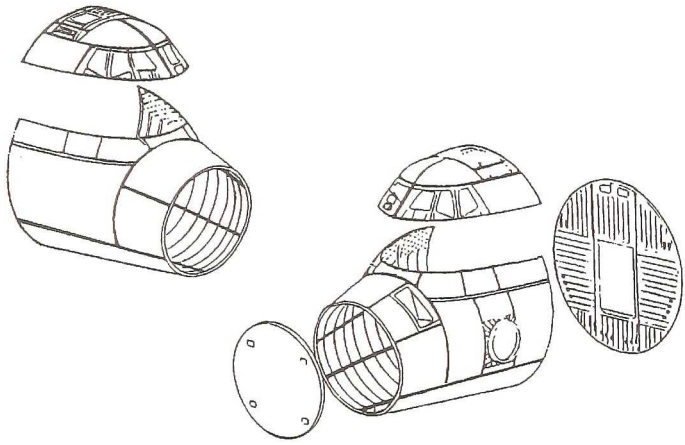


Рис.2.3. Сварные элементы командного модуля

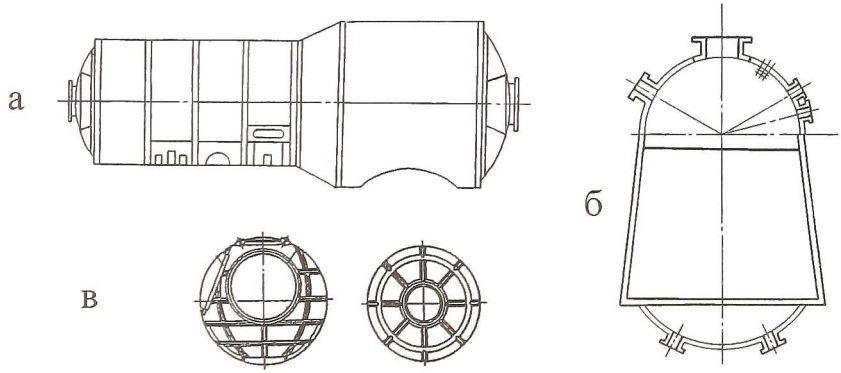


Рис.2.4. Основные сварные агрегаты орбитальных станций и КА:
а рабочий отсек орбитальной станции "Салют"; б СА космического корабля "Союз"; в - СА автоматического КА

данный уровень герметичности должен сохраняться на протяжении всего полета аппарата. Допустимое падение давления за период эксплуатации не более $(7...8)\cdot10^2$ Па. Герметичность корпусов аппаратов обеспечивается выбором рациональных конструктивно-технологических решений. Проблемы повышения герметичности отсеков ЛА нашли отражение и в совершенствовании способов сварки. Так, эффективными технологическими приемами повышения герметичности сварных швов из алюминиевых сплавов является проведение аргонодуговой сварки неплавящимся электродом с электромагнитным перемешиванием сварочной ванны и прерывистой подачей присадочной проволоки.

Сварка также широко применяется и в самолетостроении. В настоящее время сварка применяется для изготовления многих важнейших агрегатов: элементов фюзеляжа, крыла, баков, трубопроводов, шасси, сотовых панелей, в которых используются высокопрочные, жаростойкие стали, титановые и алюминиевые сплавы. Причем, применение находят как дуговая, контактная сварка, так и специальные виды: электронно-лучевая, диффузионная сварка и др.

Таким образом, сборочно-сварочные работы являются очень важным компонентом производства ЛА самого различного назначения.

2.2. Физические основы сварочных процессов. Классификация процессов сварки

В соответствии с ГОСТ 2601-84 сваркой называется технологический процесс изготовления неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями изделия при их местном или общем нагреве, или пластическом деформировании, или совместном действии нагрева и пластического деформирования. Следовательно, в основе любого способа сварки лежат процессы по созданию условий, при которых образуются межатомные связи на границе раздела соединяемых элементов. Принято считать, что металлы обладают электроположительными (+), а металлоиды электроотрицательными (-) свойствами. В зависимости от природы соединяемых тел возможно образование трех основных типов связей: ковалентной, металлической, ионной. Кроме того, в твердых телах существует молекулярная связь Ван-дер-Ваальса. Она обусловлена явлением поляризации, при котором электроны в сближаемых атомах начинают двигаться согласованно.

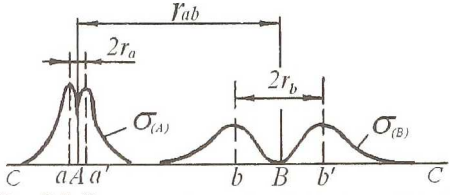


Рис.2.5. Распределение плотности электронной энергии при сближаемых атомов А и В

На рис.2.5 показана схема взаимодействия двух атомов А и В, где σ плотность электронной энергии каждого из атомов; r_A и r_B расстояния, на которых наиболее вероятно пребывание электрона каждого атома. При сближении атомов волновые функции валентных электронов начинают перекрываться и они вступают во взаимодействие. При этом изменение потенциальной энергии взаимодействия представлено на рис. 2.6. На расстоянии r_1 между атомами устанавливаются молекулярные связи Ван-дер-Ваальса, что соответствует минимуму потенциальной энергии на кривой *II*. Дальнейшее взаимодействие связано с необходимостью введения энергии (активации) в систему, что приводит к изменению

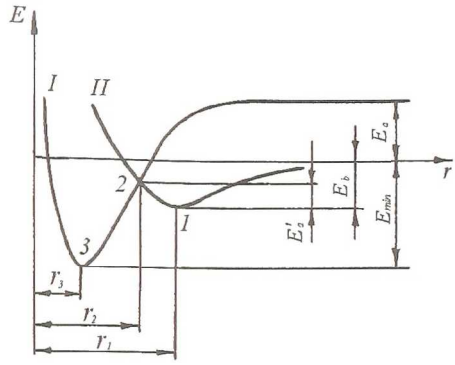


Рис.2.6. Изменение понециальной энергии при сближении ювенильных поверхностей

потенциальной энергии соответственно из точки *1* кривой *II* в точку *2* пересечения с кривой *I*. В данном возбужденном состоянии возникают предпосылки образования химической связи того или иного типа в зависимости от природы атомов. При этом происходит самопроизвольное выделение энергии и её рассеяние, а система приобретает минимум потенциальной энергии, соответствующий точке *3* на кривой *I*. Необходимо отметить, что прочность Ван-дер-Ваальсовой связи (E_1) 0,84...8,4 кДж/моль, в то время как энергия химической связи (E_3) лежит в пределах 84...840 кДж/моль. Энергия $E_2=E_a'$ называется энергией активации процесса образования химических связей.

Большинство металлов образует простые симметричные решетки куб, центрированный куб, гранецентрированный куб, гексагональную плотноупакованную решетку, однако некоторые металлы (галий, индий, германий) имеют особо сложное кристаллическое строение. Энергетические спектры внутренних атомов кристалла взаимно уравновешены. Спектры наружных атомов кристалла не уравновешены. Они образуют силовое поле с повышенной потенциальной энергией. Следовательно, поверхность металла обладает дополнительной энергией, которая называется поверхностной энергией.

Строение реальной металлической поверхности весьма сложно и в значительной степени отличается от идеальной ювенильной поверхности. Вследствие высокой активности поверхностных слоев металла поверхность всегда покрыта окислами, жидкими и газовыми пленками. Ювенильная поверхность может существовать очень короткие промежутки времени, например, в изломе металлов при совместном деформировании или после его механической обработки.

На воздухе микровыступы и впадины поверхности многих металлов, кроме так называемых благородных (золото, платина и др.), мгновенно покрываются пленками окислов, а также слоями адсорбированных молекул газа, воды и жировых веществ. Толщина и последовательность расположения таких пленок может быть различной. Непосредственно на поверхности металла обычно находится пленка окислов (рис.2.7, слой а).

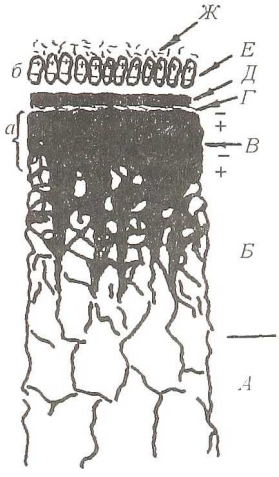


Рис.2.7. Поверхность металла на воздухе:

А слой металла, пластически недеформированный; Б поверхностный слой полностью разориентированных кристаллов с прослойками окислов; В Окисный слой, характерная полярность границ (внутренних и внешних), а также полярность верхних слоев показаны знаками ±; Г адсорбированный слой кислородных ионов и нейтральных молекул воздуха; Д слой водяных молекул; Е - слой жировых молекул; Ж - ионизированные пылевые частицы

Слой окислов сохраняет на границе с металлом отрицательный потенциал против положительного потенциала самого металла. Наружная поверхность слоя окислов имеет положительный потенциал и они адсорбируют кислород, имеющий отрицательный потенциал. Таким образом, поверхность металла (рис.2.7) покрывается двумя двойными электрическими слоями. Окисные пленки обычно очень хрупкие и обладают высокой твердостью. Кроме пленки окислов поверхность металла покрыта газовыми молекулами, жировыми пленками и парами воды (рис.2.7, слой б). Толщина этих пленок различна. Например, толщина пленки воды составляет 50...100 молекул. Жировые слои имеют большую толщину. Полностью удалить масляные пленки с металла практически невозможно никакими растворами, поскольку адсорбционная связь жировых молекул и металла представляет собой чисто электрическую связь. Полярные жировые молекулы образуют с металлом двойной электрический слой, что обеспечивает весьма прочную связь металла и пленки одномолекулярной толщины. После промывки металла бензином слой органических молекул составляет 1...5 мкм, и только при особо тщательной обработке растворителями сохраняется жировая пленка толщиной 10...100 молекулярных слоев.

Кроме наличия на поверхности различного рода пленок, строение реальной поверхности характеризуется её геометрией. Геометрия реальной металлической поверхности определяется её волнистостью. Волнистость характеризует геометрию поверхности в макроскопическом, а шероховатость в микроскопическом масштабе. Нужно также отметить ультрамикронеровности. Шероховатости могут быть весьма разнообразны по высоте микровыступов и расстоянию между их вершинами. Вследствие наличия главным образом микронеровностей действительная площадь поверхностей металлов во много раз превышает площадь, измеренную обычными методами.

Таким образом, соединение реальных твердых тел при сварке затрудняется рядом обстоятельств. Во-первых, реальные твердые тела

поликристаллические; во-вторых, их поверхности имеют сложную форму и покрыты различными пленками. Поэтому образование прочного соединения возможно лишь при условии удаления из зоны соединения загрязнений и обеспечения сплошного физического контакта по соединяемым поверхностям. В реальных условиях для формирования неразъемного соединения необходимо затратить энергию не только на активацию поверхностных атомов, но и на очистку поверхностей в зоне соединения и формирование сплошного физического контакта.

Исходя из вышеизложенного, сварку можно отнести к классу так называемых топохимических реакций. Формирование прочного сварного соединения осуществляется в три стадии. На первой стадии развивается физический контакт, на второй стадии образуются химические связи на микроучастках, на третьей стадии процесс сварки завершается диффузией. Причем диффузионные процессы развиваются почти одновременно с прорастанием дислокаций при пластическом деформировании либо при наличии высокой температуры.

В зоне сварки можно установить наличие двух основных явлений, связанных с термодинамически необратимым изменением формы энергии и состояния вещества (рис.2.8). К первому можно отнести введение и преобразование энергии, ко второму превращения вещества. Термодинамическое определение процесса сварки звучит следующим образом: сварка это процесс получения монолитного соединения материалов за счет термодинамически необратимого превращения тепловой и механической энергии и вещества в стыке.

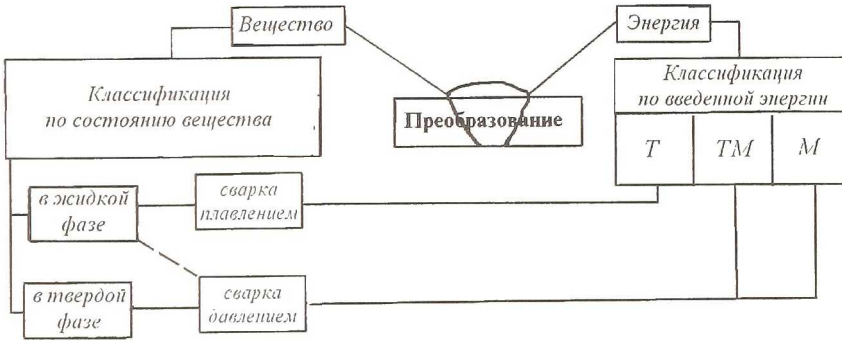


Рис.2.8. Классификация процессов сварки

Склеивание, цементирование и другие соединительные процессы, обеспечивающие монолитность соединения, в отличие от сварки и пайки, как правило, не требуют специальных источников энергии и реализуются только за счет введения и преобразования вещества (клея, цемента и т.д.).

На основе анализа термодинамических превращений все процессы сварки классифицируются по физическим признакам: виду

энергии, используемой для образования сварного соединения и состоянию вещества. По состоянию вещества все способы разделяются на сварку в жидкой фазе и сварку в твердой фазе (сварку плавлением и сварку давлением). По виду использованной энергии различают три класса сварки: термический (Т), термомеханический (ТМ) и механический (М). Причем процессы сварки термического класса, как правило, относятся к сварке плавлением, а термомеханического и механического - к сварке давлением.

Процессы сварки классифицируются и по ряду других признаков. По виду источника энергии: дуговая, плазменная, электронно-лучевая, контактная, диффузионная, ультразвуковая, сварка трением и др.). По способу защиты металла в зоне сварки: в защитных газах, в вакууме, под флюсом. По непрерывности процесса: непрерывные и импульсные способы. По степени механизации: ручная, полуавтоматическая, автоматическая, с использованием роботов. По роду сварочного тока: переменный, постоянный. По виду электрода: плавящийся, неплавящийся и т.д.

2.3. Сварка давлением. Особенности формирования соединений при сварке давлением

По современным представлениям процесс образования соединения при любых способах сварки без расплавления рассматривается как процесс, протекающий в три стадии.

1. Образование физического контакта, т.е. сближение атомов соединяемых материалов за счет пластической деформации на расстояние, при котором становится возможным квантово-механическое взаимодействие электронных оболочек поверхностных атомов.
2. Активация контактных поверхностей (образование активных центров). Активация контактных поверхностей начинается уже в процессе их сближения при смятии отдельных микровыступов за счет совместной пластической деформации.
3. Объемное взаимодействие. Эта стадия наступает с момента образования активных центров на соединяемых поверхностях. В течение третьей стадии происходит развитие взаимодействия соединяемых материалов как в плоскости контакта с образованием прочных связей, так и в объеме зоны контакта. Для обеспечения требуемой точности соединений часто необходимо дальнейшее развитие процессов рекристаллизации или диффузии.

В п.2.2 показано, что реальные металлические поверхности имеют сложное геометрическое и физическое строение. На первой стадии формирования соединений при сварке давлением реализуются процессы по развитию максимальной площади фактического контакта и очистки поверхностей от окислов и адгезионных наслоений.

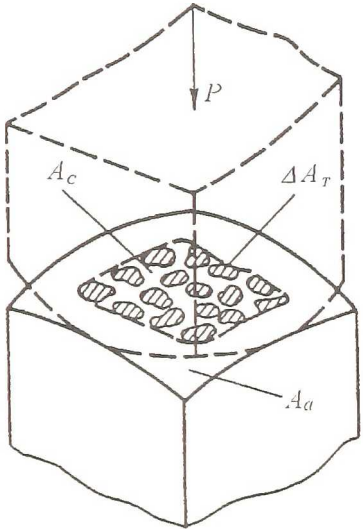


Рис.2.9. Схематическое изображение стыкового механического контакта волнистой и шероховатой поверхности

При контактном взаимодействии шероховатых деталей различают три вида площади контакта номинальная, контурная и фактическая (рис.2.9). Номинальная площадь контакта (Aa) определяется формой и размерами деталей. При смятии микровыступов в плоскости реального контакта может образоваться n площадок, сумма которых определяет фактическую площадь контакта $A_r=n\cdot\Delta A_r$. Контурной площадь контакта (A_c) определяется границами, в пределах которых вписываются все элементарные площадки контакта.

Если контурная площадь под действием давления и нагрева стремится в пределе к номинальной, то, видимо, фактическая имеет своим пределом контурную. Закономерность изменения фактической площади контакта под действием давления ΔP и температуры нагрева Θ определяется критериальным числом X [42].

Критерий X зависит от класса шероховатости поверхности и температуры контактирования. Например, для тонкой (чистой) обработки

$$X=\Theta\Delta P/(\Theta_{хол}\,\sigma_T b)\ ,$$

где Θ- температура горячего металла в зоне контактирования; $\Theta_{хол}$ температура 20^0C; σ_T предел текучести металла; b коэффициент, характеризующий деформационную способность шероховатой поверхности, ΔP давление сжатия. Фактическую площадь контакта можно определить по формуле $A_r=A_c(1-e^{-X})$.

При контактном взаимодействии в стыке возникают напряжения, которые оказывают существенное влияние на процессы образования соединений. Для анализа напряженного состояния в зоне сварки широко используются теоретические представления, развитые в теории обработки металлов давлением о распределении нормальных и касательных напряжений при пластическом деформировании цилиндра диаметром d и высотой h. Как показано во многих экспериментальных исследованиях, наибольшее число узлов схватывания (сварки) реализуется в зоне, где действуют максимальные касательные напряжения. В то же время форма и размеры зоны максимальных касательных напряжений зависит от отношения d/h факто-

ра формы. Причем, с ростом фактора формы возрастает работа сил трения, а следовательно, энергия, выделяемая в контакте. Регулируя фактор формы, можно изменять напряженное состояние в контакте и условия формирования сварного соединения. Необходимо отметить, что максимальные касательные напряжения в контакте зависит от коэффициента трения, который в свою очередь зависят от физико-механических свойств приповерхностных слоев, наличия адгезионных наслоений, формы поверхности, температуры и т.п.

Следует отметить, что рассмотренные представления для некоторых способов сварки давлением не применимы, например, для сварки взрывом. При сварке взрывом момент образования контакта и момент его свариваания по времени не различимы.

Каждый процесс сварки давлением может обеспечить высокое качество соединения, в том числе когда все оксидные и адсорбционные наслоения в плоскости контакта в процессе плавления растворяются в расплаве или полностью выдавливаются из плоскости свариваемого контакта при операции осадки.

Первое условие полностью соблюдается при контактной точечной и шовной сварке, второе условие выполняется для контактной стыковой, холодной, ультразвуковой и сварки трением.

Особый характер имеет очистка поверхностей при сварке взрывом и диффузионной сварке в вакууме. При сварке взрывом поверхности очищаются воздушно-плазменной кумулятивной струей. При диффузионной сварке в вакууме в зависимости от свариваемых сочетаний материалов могут реализоваться различные механизмы удаления оксидных слоев: диссоциация, растворение, восстановление и др.

Активация контакта (вторая стадия) это процесс преднамеренного повышения энергии в поверхностных слоях или по плоскости контакта, или, дополнительно к этому, в некотором объеме металла вокруг контакта. Энергия активации может быть получена за счет любого физического процесса. Механическая энергия, вводимая в свариваемый контакт, весьма универсальна и безинерционна по сравнению с тепловой. Механическая активация свариваемого контакта обеспечивает в нем не только развитие теплового эффекта, но и одновременно создает явно электрические процессы, например, наблюдается всплеск термоэлектродвижущей силы. Целый ряд теоретических и экспериментальных работ показывает, что в условиях развития пластических деформаций в контакте возникают температурные вспышки до температуры плавления и выше [42]. Их величина зависит от временной программы введения механической энергии. Все процессы сварки давлением отличаются друг от друга временной программой осадки. Можно выделить следующие процессы осадки:

- длительно действующие при постоянном давлении (диффузионная сварка);

- ударно-импульсные (сварка взрывом, магнитно-импульсная сварка);
- специально программированные по силе сдавливания и времени её действия (контактная, холодная, трением, ультразвуковая, диффузионная).

На третьей стадии процесса сварки давлением развиваются процессы взаимной диффузии, рекристаллизации, в отдельных случаях образования химических соединений (интерметаллидов, карбидов и т.п.), формируется напряженное состояние в зоне сварки.

Анализ большого числа работ, посвященных изучению диффузии, свидетельствует о том, что диффузионная подвижность увеличивается с ростом скорости деформации. При ударных нагружениях наблюдается эффект аномально высокого массопереноса в контакте (скорость массопереноса увеличивается на несколько порядков).

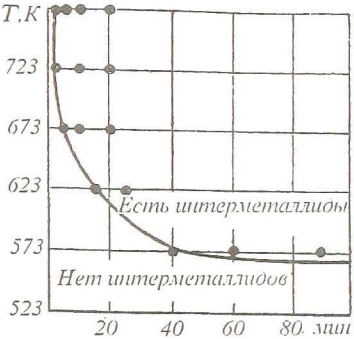


Рис.2.10. Температурно-временная зави-симость появления интерметаллидов в системе Cu-Al

Важную роль в получении качественных сварных соединений играют процессы образования химических соединений при сварке разнородных материалов. Так, например, в системе Cu-Al могут образовываться интерметаллиды трех видов $CuAl_2$, CuAl, Cu_2Al_3. Зависимость величины интерметаллидной фазы (y) от времени t может быть описана уравнением $y^n=k(t+t_0)$, где t_0 общий латентный период образования зародышей интерметаллида; k коэффициент роста интерметаллида, n экспериментально определяемый показатель степени. На рис.2.10 представлена температурно-временная зависимость появления интерметаллидов в системе Cu-Al в слое толщиной 5 мм.

Качество сварного соединения в значительной степени зависит от толщины интерметаллидного прослоя, возникающего в контакте. При критических толщинах (десятки микрон) прочность сварных соединений резко падает. В связи с этим возникает необходимость предотвращения появления и роста интерметаллических прослоек. Основными направлениями для ограничения образования и роста интерметаллических соединений являются: оптимизация режимов сварки; применение специальных "барьерных" прослоек.

Барьерные прослойки должны изготавливаться из металлов, хорошо растворимых с основными металлами. Барьерные прослойки могут состоять из одного или нескольких слоев. Например, при диффузионной сварке титановых сплавов со сталями используют прослойку, состоящую из ванадия, меди, никеля.

2.4. Основные способы сварки давлением и их применение при изготовлении агрегатов летательных аппаратов

Применение механической энергии в способах сварки давлением позволяет реализовать целый ряд преимуществ при формировании соединений по сравнению со сваркой плавлением. Эти преимущества определяются в первую очередь тем, что механическая энергия несравненно менее инерционна, чем тепловая, а при ударно-импульсных нагрузках вообще безинерционна. При этом отсутствуют недостатки, связанные с достаточно длительным термическим воздействием на свариваемые материалы при сварке плавлением: литая структура металла шва, значительные размеры зоны термического влияния, остаточные напряжения и деформации и др. В связи с этим способы сварки давлением являются перспективными технологиями получения высокопрочных и надежных неразъемных соединений в производстве ЛА.

Электрическая контактная сварка относится к одному из наиболее распространенных видов сварки. Этим способом сваривают до 30% всех сварных изделий.

Все способы контактной сварки, основные из которых точечная, шовная, стыковая, объединяет то, что для формирования соединений используются различные программируемые сочетания электрической и механической энергии. Причем электрическая энергия вводится в контакт между деталями путем пропускания через него сварочного тока, а механическая путем сдавливания и пластического деформирования материала в зоне сварки.

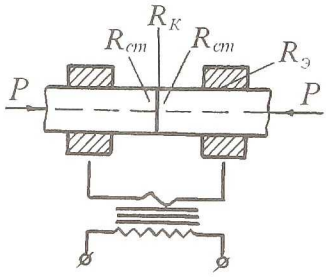


Рис.2.11. Схема нагрева при стыковой сварке

На рис.2.11 представлена схема нагрева деталей при контактной сварке. При сварке теплота, частично или полностью используемая на полезный нагрев, выделяется в контакте между торцами свариваемых стержней за счет контактного сопротивления R_k и в самих стержнях с собственным сопротивлением $R_{ст}$. Контактным сопротивлением $R_Э$ между электродами и свариваемыми стержнями можно пренебречь, так как оно относительно мало и выделяемая на нем теплота практически не сказывается на нагреве зоны сварки. Общее количество теплоты, выделяемое на участке между электродами, можно определить по формуле

$$Q = \int_0^t \left[R_k(t) + 2R_{ст}(t)\right] I^2(t)dt \ . \qquad (2.1)$$

При этом собственное сопротивление деталей (стержней) между зажимами равно:

$$2R_{cm} = K_{\Pi}\,\rho\,2l_0 / F\ , \qquad (2.2)$$

где ρ удельное сопротивление металла детали, Ом·м; $2l_0$ установочная длина деталей, м; F - площадь поперечного сечения детали, м^2; K_{Π} коэффициент поверхностного эффекта, при сварке деталей диаметром до 20 мм им можно пренебречь.

Удельное сопротивление при сварке непостоянно. Оно растет с повышением температуры.

Контактное сопротивление чистых и покрытых окислами деталей уменьшается с ростом силы P, что объясняется увеличением площади истинного (физического) контакта между ними из-за смятия поверхности выступов. Экспериментально подтверждена следующая зависимость между контактным сопротивлением и силой P:

$$R_k = r_k / P^{\alpha}\ , \qquad (2.3)$$

где r_k контактное сопротивление при P=9,8 Н; α показатель степени, лежащий в пределах 0,5…1,0.

Сопротивление контакта очень сильно изменяется при нагреве в результате роста удельного сопротивления слоя металла, прилегающего к контакту, снижения сопротивления окисной пленки и увеличения числа и площади контактов между деталями благодаря пластической деформации нагретого металла. В условиях контактной стыковой сварки сопротивлением два последних фактора имеют главное значение: с повышением температуры контактное сопротивление быстро падает и практически исчезает у стали при 873 К, а у алюминиевых сплавов при 623 К [73].

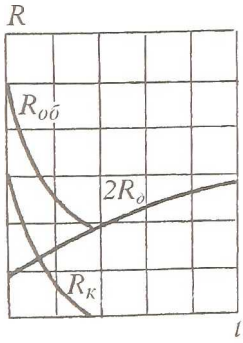


Рис.2.12. Изменение сопротивлений в процессе контактной стыковой сварки:

$R_к$ - контактного, $R_д$ деталей; $R_{об}$ - общего

При сварке, когда торцы деталей все время сжаты достаточно большой силой, контактное сопротивление относительно мало и быстро исчезает при нагреве. В процессе контактной сварки стальных стержней способом сопротивления общее сопротивление сначала быстро снижается из-за резкого уменьшения R_k, а затем снова растет вследствие увеличения собственного сопротивления нагретых деталей (рис.2.12).

Контактная точечная сварка один из высокопроизводительных способов контактной сварки, при котором соединение получается между торцами электродов, подводящих ток и передающих силу сжатия. Контактная точечная сварка выполняется на специальных машинах (рис.2.13). Машина состоит из сварочного

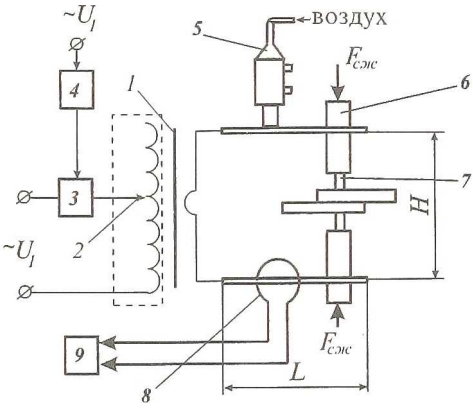


Рис.2.13. Функциональная схема сварочной машины МТП-75-9

трансформатора *1*, переключателя ступеней трансформатора *2*, прерывателя сварочного тока *3*, регулятора времени *4*, механизма сжатия деталей *5*, электрододержателей *6* и электродов *7*, датчика сварочного тока *8*, прибора для измерения сварочного тока *9*.

Основными параметрами режима точечной сварки являются: диаметр рабочей поверхности электродов $d_Э$, сила сжатия деталей $F_{сж}$, сила сварочного тока $I_{св}$, продолжительность его включения $t_{св}$.

Продолжительность отдельных составляющих цикла сварки (рис.2.14) - предварительное сжатие $t_{сж}$, сварка $t_{св}$, проковка t_k и пауза $t_п$ - задаются настройкой регулятора времени.

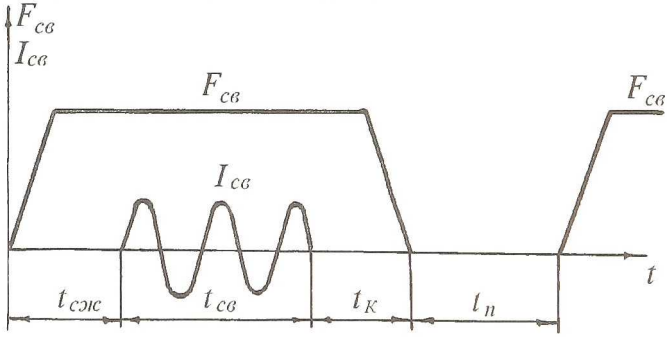


Рис.2.14. Циклограмма точечной сварки

На первой стадии сварки ($t_{сж}$) происходит смятие микровыступов и формируется предварительная площадь фактического контакта. На втором идет расплавление металла и формируются форма и размеры литого ядра. На третьем идет кристаллизация металла в литом ядре и формируется поясок вокруг него за счет сварки в результате совместной пластической деформации металла. Такая схема процесса сварки обеспечивает высокое качество и исключает дефекты, например, несплошности и выплески жидкого металла.

Сварочный ток и сила сжатия деталей должны обеспечивать плотность тока и давление в сварочном контакте, необходимые для образования литой зоны заданных размеров. Так, при сварке малоуглеродистых сталей на "жестком" режиме средняя плотность

тока в контакте электрод-деталь лежит в пределах 200...400 А/мм², а давление в пределах 50...120 МПа. Минимальная длительность прохождения сварочного тока, обеспечивающая получение сварных точек заданных размеров и прочности без выплесков при сварке, устанавливается опытным путем.

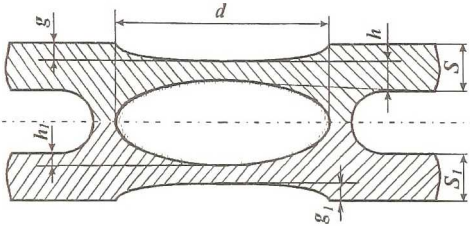


Рис.2.15. Конструктивные элементы соединения, выполненного контактной точечной сваркой

ГОСТ 15878-79 устанавливает следующие конструктивные элементы соединений, выполненных контактной точечной сваркой (рис.2.15): S и S_1 толщина детали, d расчетный диаметр литого ядра точки; h и h_1 величина проплавления; g и g_1 - глубина вмятины.

Расстояние от центра точки до края нахлестки должно быть не менее половины минимальной величины нахлестки. Величина проплавления h, h_1 должна быть от 20 до 80% толщины деталей. Глубина вмятины g, g_1 не должна быть более 20% толщины деталей. Диаметр рабочей поверхности электрода $d_э$ обычно близок к расчетному диаметру литого ядра точки d.

Высокой и стабильной прочностью обладают лишь точки с литым ядром заданных размеров.

Соединения, выполненные контактной точечной сваркой, согласно ГОСТ испытываются на срез или на отрыв.

Циклограммы контактной точечной сварки могут быть разнообразными.

Рассмотрим для примера некоторые полные циклы сварочного процесса с программированием давления, токов подогрева и отжига [42].

Цикл (рис.2.16) начинается с того, что электроды сжимают детали силой P_1, в 1,5...2 раза большей, чем это предусматривается режимом сварки. Такого рода предварительное обжатие деталей весьма желательно при сварке уже не мелких, а крупногабаритных или даже тяжелых конструкций, которые обладают некоторой собственной конструктивной упругостью или жесткостью. Через некоторый момент времени повышенное давление уменьшается до режимного, сварочного P_2 и в тот же момент включается ток подогрева контакта $I_{ПД}$, переходящий затем в сварочный ток $I_{св}$, в 1,5...2 раза больший, чем подогревающий. Если свариваемые детали оказались способными принять нежелательную сильную закалку, её снимают отжигающим током $I_{отж}$. При таком цикле переменными являются не

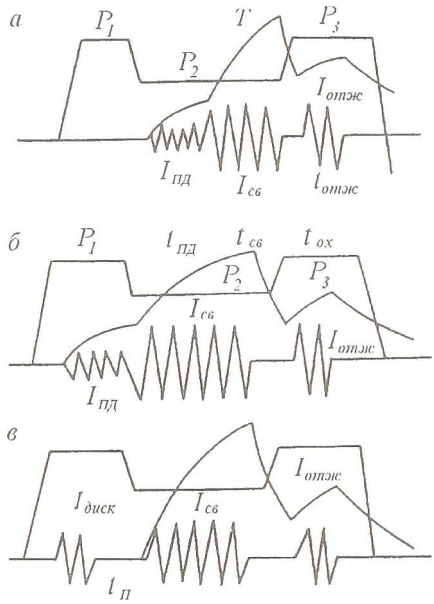


Рис.2.16. Некоторые типовые циклы точечной сварки

только амплитуды или действующие значения токов, но и все параметры времени. В некоторых случаях, при недостаточной зачистке детали, ток подогрева полезно сдвигать в область действия начального повышенного давления (рис.2.16, б). Наиболее легко осуществим эффективный цикл на машинах, даже с весьма простым регулированием режима. Этот цикл (рис.2.16, в) хорош для тяжелых конструкций и плохой зачистки деталей, для легированных сталей больших толщин. Принципиальная сущность цикла сводится к следующему: как только детали сжаты начальным повышенным давлением, на электроды подается импульс тока $I_{диск}$, по амплитуде и времени действия достаточный только для того, чтобы по плоскости свариваемого контакта образовался горячий (лучше расплавленный) диск из пирамидальных или иной формы шероховатостей. Физический смысл цикла сводится к тому, что первый импульс тока, образующий этот диск расплава, ликвидирует, по сути дела, самую нестабильную составляющую полного сопротивления.

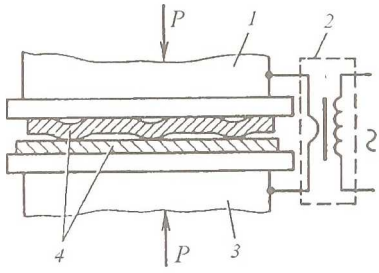


Рис.2.17. Схема рельефной сварки:
1, 3 верхний и нижний плоские электроды; 2 - сварочный трансформатор; 4 - детали

Разновидностью контактной точечной сварки является **рельефная сварка.** Сварка в данном случае происходит по предварительно подготовленным в металлических изделиях выступам (рис.2.17) [73]. Первый контакт деталей осуществляется по ограниченной рельефами площади. Форма выступов в сечении может быть, например, в виде полукруга или трапеции, которые формируют предварительно на деталях механическим путем. В начальный период сварки наличие рельефа дает возможность обеспечивать концентрированный нагрев в месте контакта при больших

плотностях тока. В дальнейшем рельефы под давлением P электродов постепенно деформируются. На определенной стадии происходят плавление металла и образование соединения по всему контуру рельефа. Обычно на поверхности деталей выполняется несколько рельефов или один выступ замкнутой формы в виде кольца. В первом случае детали соединяются одновременно в нескольких точках, во-втором образуется непрерывный герметичный шов (контурная рельефная сварка). Рельефная сварка применяется для деталей небольших размеров из-за значительной потребляемой мощности.

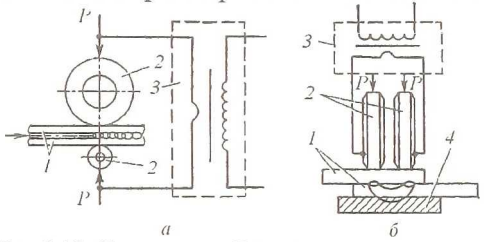


Рис.2.18. Схема шовной сварки:
а - двухсторонняя; б односторонняя; 1 свариваемые детали; 2 - сварочные ролики; 3 сварочный трансформатор; 4 - медная подкладка

Шовная сварка обеспечивает соединение элементов внахлестку вращающимися дисковыми электродами в виде непрерывного или прерывистого шва (рис.2.18). В зависимости от характера вращения роликов различают непрерывную и шаговую (прерывистую) шовную сварку [73].

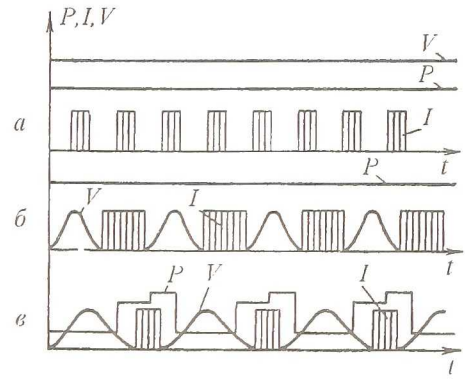


Рис.2.19. График скорости перемещения деталей V, силы Р и сварочного тока I при шовной сварке:
а импульсная; постоянная сила и непрерывное вращение роликов; б - импульсная подача тока, шаговое вращение, постоянное давление; в - импульсная подача тока, шаговая сварка с переменным давлением

При непрерывной сварке ток подается при вращающихся роликах непрерывно или в виде импульсов при постоянном давлении на электродах. Импульсная подача тока (рис.2.19, а) во многих случаях является более оптимальной. Точка образуется в этом случае при прохождении каждого отдельного импульса. Перемещение свариваемых деталей и частоту импульсов надо подбирать так, чтобы точки перекрывали друг друга на 30...50%, тогда соединение получится плотным. При большой скорости перемещения деталей и малой частоте импульсов можно получить прочные, но не герметичные швы, аналогичные швам, полученным при точечной сварке.

При сварке некоторых материалов и прежде всего алюминиевых сплавов рекомендуется **шаговая (прерывистая) сварка** (рис.2.19, б,

в). Она заключается в том, что в период подачи сварочного тока дисковые электроды (ролики) неподвижны относительно изделия, а перемещение изделия происходит вследствие периодического поворота электродов на небольшой угол в паузах между импульсами тока. Такой режим сварки ускоряет кристаллизацию точки, улучшает условия охлаждения роликов, уменьшает их износ, стабилизирует качество точки. Давление на электродах может быть постоянным (см.рис.2.20, б) или увеличиваться в конце сварки (см. рис.2.20, в). Последнее позволяет осуществлять проковку точки.

Характеры образования соединения при точечной сварке и при шовной, особенно при шаговой, практически аналогичны друг другу. С определенным приближением шовную сварку можно рассматривать как особый случай точечной, когда расстояние между точками минимально. Однако следует иметь ввиду и некоторые особенности шовной сварки. Прежде всего это касается параметров режимов сварки. Так, из-за значительного шунтирования через ранее сваренные точки при шовной сварке требуются большие мощности, чем для точечной. С учетом более жестких режимов при шовной сварке и шунтирования сила тока по сравнению с точечной выбирается больше на 20...60%.

Достоинства шовной сварки плотнопрочные швы, высокая производительность, возможность полностью автоматизировать процесс - обеспечили ей широкое применение при изготовлении узлов ЛА, авиационных двигателей, приборов, особенно, где нужна герметизация. Это прежде всего топливные баки, герметичные сосуды и контейнеры самого различного назначения. С помощью шовной сварки соединяются шпангоуты с цилиндрическими обечайками, чем обеспечивается высокая надежность соединений, работающих при значительных нагрузках.

Стыковая контактная сварка сварка, при которой соединение свариваемых частей происходит по поверхности стыкуемых торцев.

Наибольшее распространение получили способы стыковой сварки сопротивлением и оплавлением. При сварке сопротивлением концы деталей, плотно сжатых осевой силой, нагреваются током без расплавления. При этом они пластически деформируются и свариваются.

Сварку оплавлением подразделяют на сварку непрерывным оплавлением и оплавлением с подогревом. Сварка оплавлением начинается с медленного сближения до соприкосновения торцев при включенном сварочном трансформаторе, но без сдавливания их заметной силой. В момент касания торцев между ними образуется контакт, электрическое сопротивление которого из-за отсутствия сжимающих сил относительно велико. При протекании через такой контакт большого сварочного тока выделяется много теплоты, и окружающий его металл почти мгновенно плавится, образуя между

торцами деталей жидкие перемычки. При дальнейшем нагреве током перемычки взрываются. Это приводит к выбрасыванию из зазора между торцами частиц металла в виде искр и некоторому укорочению деталей. При постепенном их сближении образуются все новые контакты и перемычки, что приводит к интенсивному нагреву концов деталей. Частые взрывы перемычек создают впечатление непрерывного искрообразования, характерного для сварки оплавлением. После образования на торцах тонкого слоя расплавленного металла и достаточного прогрева деталей по длине они сдавливаются осевой силой (осаживаются). При этом расплавленный металл вытесняется из зазора, а расположенный под ним чистый, хорошо разогретый металл пластически деформируется и сваривается.

При сварке оплавлением с подогревом детали предварительно подогреваются методом сопротивления в процессе кратковременных замыканий их торцев, а затем оплавляются.

Параметры режима стыковой сварки находятся между собой в сложной зависимости и связаны с конкретными характеристиками сварочных машин. Они выбираются на основании справочных данных, а затем корректируются при сварке образцов. При выборе режимов стыковой сварки необходимо учитывать следующее.

1. Силу свариваемого тока, который определяется площадью сечения свариваемых деталей, теплофизическими свойствами металла и конфигурацией сечения деталей.
2. Согласование скорости оплавления торцев со скоростью сближения. Чем больше мощность машины и сварочный ток, тем больше скорость оплавления. Кроме того, она зависит и от температуры нагрева деталей.
3. Силу осадки, которая зависит от площади сечения деталей и физико-механических свойств свариваемого металла, определяется как произведение рекомендуемого давления q на площадь поперечного сечения $S=qF$, где q давление, Па; F площадь сечения, м^2.
4. Скорость осадки, которая зависит от скорости охлаждения и кристаллизации металла в зоне свариваемого стыка. Снижение скорости осадки ухудшает условия удаления окислов металла из шва, так как при этом увеличивается время закрытия зазора между деталями и время процесса деформирования.

Конструкции сварных соединений для стыковой сварки должны максимально удовлетворять требованию равномерного нагрева обеих деталей. Это достигается при сварке деталей с одинаковым сечением из одного и того же металла. Если детали имеют разное сечение, необходимо изменением конструкции одной из них добиться более близких по характеру условий теплоотвода при сварке.

Стыковая сварка в настоящее время применяется для изготовления деталей из сталей, алюминиевых, титановых, медных сплавов и некоторых тугоплавких металлов. Например, в производстве ЛА стыковая контактная сварка используется для изготовления шпангоутов больших размеров, соединения отдельных

секций герметичных отсеков ракет и т.д. Ею можно соединять детали как с компактными, так и развитыми, сложными сечениями.

В последние годы все чаще в самых разных областях техники (ракетной, авиационной, автомобильной, а также в судостроении, аппаратостроении и др.) используется **сварка взрывом**. Этим способом соединяют самые различные (компактные и порошковые) металлы и сплавы, получают сложные композиционные материалы (два, три и более слоев) и осуществляют сложное формоизменение разнообразных материалов.

При сварке взрывом образование соединения происходит в процессе соударения двух свариваемых деталей (пластин) под воздействием ударной волны. При этом ударная волна очищает поверхность и деформирует прилегающие к зоне соединения приповерхностные объемы материала. Схема сварки показана на рис. 2.20.

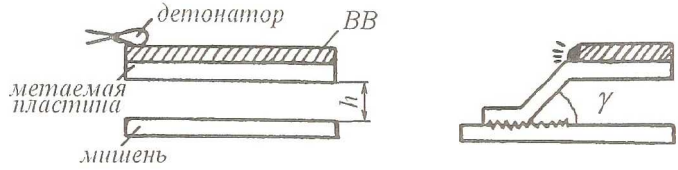


Рис.2.20. Схема сварки взрывом с параллельным расположением пластин

Для получения соединения при сварке взрывом необходимо выполнение двух условий:

- давление при соударении должно достичь определенного значения;
- скорость перемещения точки соударения должна быть меньше скорости звука.

Давление при соударении зависит от скорости движения пластины, а равновесная скорость движения пластины от соотношения c/m, где c - масса заряда; m - ускоряемая масса.

Так как ускорение движения пластины до конечной скорости занимает определенное время, между метаемой пластиной и мишенью должно быть достаточное расстояние (зазор). Давление на поверхности раздела при соударении должно быть в 10 раз больше предела текучести материала. Установлено, что обобщающим параметром сварки взрывом может быть пластическая деформация материала в зоне соединения. Скорость перемещения точки соударения не должна превышать скорости звука в металле по следующим причинам. Когда две пластины первоначально параллельны, и детонация распространяется с одного конца, скорость перемещения точки соударения равна скорости детонации заряда. Скорость ударной волны приближается к скорости звука в металле пластины (например, в алюминии 5240 м/с, в меди 3580 м/с). Если скорость детонации боль-

ше скорости звука, то отраженная звуковая волна может разрушить только что созданное сварное соединение. Поэтому подбирают такое взрывчатое вещество (ВВ) (аммониты, гранулиты, зерногранулиты), чтобы скорость детонации была от 2500 до 3600 м/с, тогда отраженная звуковая волна ударяется о свариваемую плоскость раньше, чем давление взрыва ударом соединит верхнюю пластину с нижней.

Большинство технологических схем сварки взрывом основано на использовании направленного (кумулятивного) взрыва. Кумулятивность осуществляется тем, что свариваемые детали располагаются под некоторым углом 2...16° и начальным расстоянием друг от друга в вершине угла 2...3 мм.

Следует учесть, что воздушная кумулятивная струя во всех случаях движется с большей скоростью, чем звуковая и детонационная. Эта струя, направленная из острия угла γ в сторону его раствора, обладает давлением порядка от нескольких тысяч до 10^{11} Па. Благодаря такому огромному давлению и весьма большой скорости (6000...7000 м/с) высокотемпературная кумулятивная струя производит прежде всего идеальную очистку поверхности пластин от любого вида загрязнения. Однако эта же струя создает и весьма характерный волновой профиль на поверхности металла с высотой и длиной волн порядка десятых долей миллиметра.

Несмотря на большое давление воздушной кумулятивной струи и последующий за ней сильнейший удар детонационной волны взрыва, зона пластических деформаций в сварном контакте относительно невелика, она лишь немного превышает толщину фронта ударной волны, составляющей приблизительно 30...300 параметров кристаллической решетки. Исходная толщина свариваемых деталей почти не изменяется и после сварки. Весь процесс сваривания протекает за миллионные доли секунды, что и определяет значительное структурное своеобразие самого сварного соединения. В микромасштабе кристаллов металл нагревается почти до температуры кипения ($T_{кип}$=2500 К). В результате этих процессов происходит значительное упрочнение металла. Например, известно, что взрывным ударом твердость отожженной малоуглеродистой стали можно увеличить в 4 раза, предел текучести в 6 раз. Качество взрывно-сварных соединений будет высоким, если правильно подобрать режимы сварки (сорт ВВ, его толщина, взаимное расположение деталей) для каждого сечения металлов. Сварные соединения выдерживают в дальнейшем любую механическую и термическую обработку.

Особенности процесса сварки взрывом следующие:

- сварное соединение образуется в течение миллионных долей секунды, т.е. практически мгновенно. Оно возникает вследствие образования металлических связей при совместном пластическом де-

формировании свариваемых поверхностей металла. Малая продолжительность сварки предотвращает возникновение диффузионных процессов. Это позволяет сваривать металлы, которые при обычных процессах сварки с расплавлением образуют в шве хрупкие интерметаллические вещества, делающие швы непригодными к эксплуатации;

- при сварке взрывом можно получить соединения неограниченной площади. При этом процесс сварки осуществляется тем легче, чем больше отношение площади соединения к толщине метаемой части металла. Можно осуществлять сварку соединений площадью 15...20 м^2

Магнитно-импульсная сварка является разновидностью соединения в твердой фазе и, как и сварка взрывом, характеризуется высокоинтенсивным силовым воздействием.

Процессы образования соединения при сварке взрывом и магнитно-импульсной сварке едины и рассмотрены выше. То же относится и к большинству технологических особенностей. Основными (регулирующими) параметрами магнитно-импульсной сварки является энергия магнитного импульса W, зазор между стационарным и метаемым элементами h, толщина метаемого элемента δ. Производными этих параметров является скорость соударения метаемого элемента v и длительность его движения t. Независимым параметром (характеристикой установки) является длительность действия магнитного импульса t_0.

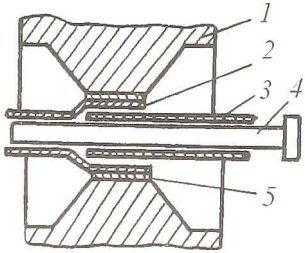


Рис.2.21. Форма и расположение образцов перед сваркой:
1 индуктор; 2 - метаемая трубка; 3 - стационарная трубка; 4 - оправка; 5 изолирующая прокладка

В настоящее время разработано несколько типов оборудования для магнитно-импульсной сварки. Например, установка УМИС-02/20 имеет следующие характеристики: максимальная энергия магнитного импульса 20 кДж, частота разрядного тока 25 кГц. Период разрядного тока 40 мкс. Форма и расположение трубчатых образцов перед сваркой и конфигурация рабочей зоны концентратора магнитного поля показаны на рис.2.21. Данный способ сварки в настоящее время находит практическое применение. Достоинством его по сравнению со сваркой взрывом является отсутствие необходимости в применении взрывчатого вещества и простота регулирова-ния основных параметров процесса.

Холодная сварка это процесс получения неразъемного соединения пластичных металлов путем их совместного пластического деформирования при комнатной температуре.

Основными способами холодной сварки являются: точечная сварка внахлестку, шовная сварка внахлестку, сварка встык и сварка сдвигом.

На рис.2.22 а представлена схема точечной сварки внахлестку. Действием пресса, сжимающего пуансоны *1* силой Р, выступы *2* вгоняются в листы металла *3* на всю их высоту, пока опорные поверхности пуансона не упрутся в поверхности металла и там не прекратят дальнейшее вдавливание выступов *4*. В месте вдавливания пуансонов остаточная толщина металла составляет лишь часть суммарной толщины листов. Сварка происходит при достижении определенной, достаточно большой степени деформации свариваемых материалов. В зависимости от вида свариваемого металла необходимая для холодной сварки степень деформации составляет 80...95%. Степень необходимой деформации при сварке друг с другом разноименных разнородных металлов определяется свойствами того из свариваемых материалов, при сварке которого в одноименном сочетании требуется меньшая деформация. Поэтому при сварке плохосвариваемых, малопластичных металлов, применяют прокладки из пластичных хорошо свариваемых металлов.

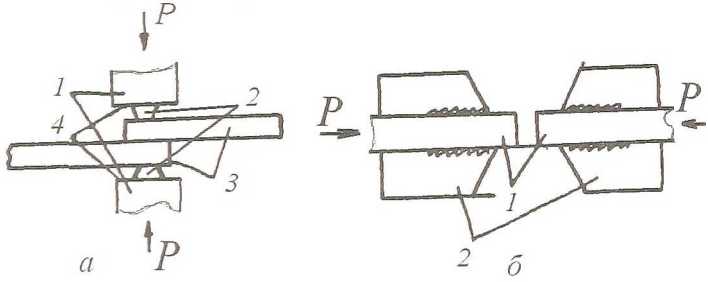


Рис.2.22. Схемы процессов холодной сварки:
а - холодная точечная сварка; б - сварка встык

Точечной сваркой успешно соединяются листы толщиной от 0,1...0,2 до 12...15 мм. Сила на одну точку при сварке алюминия в среднем 15...120 кН. Давление на рабочую поверхность пуансона 600...800 МПа. Недостатком точечной сварки является глубокая вмятина в металле, часто на 80...90% его толщины. Заменив точечные пуансоны стальными роликами соответствующей конфигурации, катящимися по металлу, можно осуществить шовную сварку. Такой способ применяется преимущественно для получения кольцевых замкнутых швов, например, для приварки дна или крышки к бесшовному корпусу.

Схема сварки встык представлена на рис.2.22, б. Подлежащие сварке стержни *1* зажимают в зажимах *2*. Концы свариваемых деталей выпускают из зажимных губок на определенную длину, называемую вылетом. При осадке правый и левый зажимы сближают до

соприкосновения и острый, как нож, край зажимов обрубает выдавленный металл. Таким образом свариваются стержни и проволока круглого, квадратного и прямоугольного сечений, полосы и т.п. Место сварки получается чистым и не требует последующей обработки. Металл в зоне сварки упрочняется наклепом и разрыв при испытаниях происходит всегда вне зоны сварки.

Холодную сварку можно осуществить путем сдавливания соединяемых деталей с одновременным их тангенциальным относительным смещением. Этот способ сварки получил название сварки сдвигом. При приложении тангенциальной силы начинается перемещение поверхностей, в процессе чего окисные пленки и загрязнения сдираются и образуются отдельные мостики контакта. Тангенциальное смещение соединяемых изделий дает возможность получить сравнительно большие площади очищенных от пленок поверхностей при небольшом растекании каждой из них.

При сварке сдвигом разноименных металлов прочное соединение возникает только у металлов с близкими механическими свойствами, например, у наклепанного алюминия, отожженной меди и др.

Холодная сварка успешно применяется для изготовления теплообменников. При этом два алюминиевых листа свариваются по всей поверхности соприкосновения посредством совместной прокатки. Посредством точечной сварки алюминиевые листы облицовываются мягкой листовой медью толщиной 0,8...1,0 мм. Эти шины дают хороший электрический контакт и вполне работоспособны. Применение алюминиевых шин полностью себя оправдало и дает значительную экономию дефицитной меди.

Общий расход электроэнергии при холодной сварке в 20...30 раз меньше, чем при контактной электросварке. Применение холодной сварки ограничивается физическими свойствами металлов. Недостаточно пластичные металлы, например, высокопрочные алюминиевые сплавы, часто дают трещины при деформациях, необходимых для холодной сварки. Высокопрочные металлы даже и при достаточной пластичности практически не свариваются холодным способом, так как удельные давления при этом настолько велики, что невозможно изготовить достаточно прочные приспособления и рабочий инструмент.

Сварка трением является разновидностью сварки давлением, сварное соединение образуется в результате совместного пластического деформирования соединяемых деталей в твердой фазе. От других видов сварки давлением она отличается прежде всего способом нагрева, точнее - способом введения теплоты в свариваемые детали. При сварке трением механическая энергия, идущая на преодоление сил трения между состыкованными деталями, непосредственно преобразуется в тепловую, причем генерирование теплоты строго локализовано в тонких поверхностных слоях металла.

Именно эта особенность процесса предопределяет основные достоинства сварки трением.

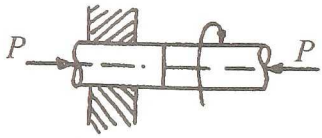


Рис.2.23. Схема процесса сварки трением

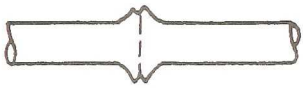


Рис.2.24. Вид соединения, полученного сваркой трением

На рис.2.23 представлена простейшая схема процесса сварки. Две детали, подлежащие сварке, располагаются соосно в зажимах машины, одна из которых закрепляется неподвижно. На сопряженных поверхностях деталей, прижатых одна к другой осевой силой P, возникают силы трения. Работа, затрачиваемая на преодоление этих сил, превращается в теплоту, которая выделяется на поверхностях трения и вызывает их интенсивный нагрев до температур, необходимых для образования сварного соединения. Применительно к сварке черных металлов эти температуры в зависимости от режима процесса лежат в пределах 1223...1573 К. По достижении требуемой температуры относительное движение поверхностей должно быть по возможности быстро (мгновенно) прекращено; при этом прекратится и тепловыделение. Процесс образования сварного соединения завершается стадией проковки. В этом случае к нагретым, но уже неподвижным деталям на некоторое время прикладывается сжимающая сила. Во время проковки и после нее происходит естественное охлаждение сварных деталей. Типичный вид соединения, полученного сваркой трением, представлен на рис.2.24.

Сварка трением обладает рядом достоинств: высокой производительностью, малым потреблением энергии (в 5...10 раз меньше, чем при контактной сварке); высоким качеством сварных соединений; стабильностью качества; возможностью сварки металлов и сплавов в различных сочетаниях; возможностью сварки деталей с необработанными поверхностями; простотой механизации и автоматизации. Многие из этих свойств являются результатом свойственного этому процессу локализованного выделения теплоты в тонких приповерхностных слоях металла, т.е. именно там, где это и требуется для сварки.

Особенностями сварки трением, ограничивающими или затрудняющими её применение, являются следующие:

- одна из деталей должна представлять собой тело вращения, ось которого совпадает с осью вращения, а другая деталь должна иметь плоскую поверхность, с которой сопрягается торец первой детали;
- нецелесообразно сваривать стержни диаметром больше 200 мм. Диапазон сечений деталей, которые можно сваривать трением, лежит в пределах 30...8000 мм^2.

Расширить возможность применения сварки трением крупных деталей, вращение и в особенности быстрое торможение которых в конце процесса сильно затруднено, можно путем вращения вспомогательных деталей, зажатых между двумя не вращающимися и подлежащими сварке деталями. Эта схема позволяет также сваривать протяженные детали, например, трубы.

Внешними (независимыми) параметрами процесса являются скорость вращения и давление, приложенное вдоль оси, определяющие мощность тепловыделения. Пластическая деформация при сварке трением является необходимым условием образования доброкачественного соединения. Поэтому третьим параметром процесса является мера пластической деформации, за которую может быть принято сближение свариваемых деталей в осевом направлении осадка. Иногда вместо этого параметра удобнее контролировать время (длительность) нагрева, определяющее температуру в стыке. Обычно осадка или продолжительность нагрева используется для автоматического прекращения тепловыделения, когда одна из этих величин достигает наперед заданного значения.

Важно подчеркнуть, что произвольное варьирование одного из основных параметров процесса совершенно недопустимо. Сварное соединение удовлетворительного качества может быть получено лишь при условии правильно выбранного сочетания всех трех основных параметров.

Еще одним (четвертым) параметром процесса сварки трением является давление проковки. Стадия проковки, наступающая сразу после окончания стадии нагрева (т.е. в момент торможения вращающейся детали), характеризуется тем, что металл, доведенный в результате нагрева до требуемых температур в стыке и достаточно притертый вдоль оси деталей, подвергается воздействию внешней силы, обжатию, проковке. Это необходимо для окончательного сближения деталей, для "залечивания" пустот, которые могли образоваться в процессе относительного движения контактирующих поверхностей. От того, насколько сильно будет сжат (прокован) металл, после того как в стадии нагрева он был доведен до состояния повышенной пластичности, зависит качество будущего сварного соединения.

Около половины действующего в стране оборудования для сварки трением обслуживает производство концевого режущего инструмента (сверл, фрез и других), используется для сварки мерительного инструмента и деталей вращающегося центра для токарных станков. Сварка трением используется для изготовления деталей гидро- и пневмоцилиндров, роторов турбокомпрессоров, биметаллических деталей, например, из стали и алюминия.

Ультразвуковая сварка соединение металлов в твердом состоянии за счет возбуждения в свариваемых деталях упругих

колебаний ультразвуковой частоты при одновременном создании определенного давления.

При ультразвуковой сварке необходимые условия для образования соединения создаются в результате механических колебаний ультразвукового преобразователя. Энергия вибрации создает сложные напряжения растяжения, сжатия и среза. При повышении предела упругости соединяемых материалов происходит пластическая деформация в зоне их соприкосновения. В результате пластической деформации и диспергирующего действия ультразвука происходит удаление адсорбированных пленок жидкости, газов, органических пленок и поверхностных окислов и образуется сварное соединение. В процессе деформирования происходит увеличение площади непосредственного контакта, что обеспечивает получение прочного соединения.

Можно выделить следующие преимущества сварки ультразвуком:

- сварка ультразвуком происходит в твердом состоянии без существенного нагрева места сварки (не более 0,3...0,5 от температуры плавления соединяемых металлов), что позволяет соединять химически активные металлы или металлы, склонные образовывать хрупкие интерметаллические соединения в зоне сварки;
- возможны соединения тонких и ультратонких деталей, приварка тонких листов и фольги к деталям неограниченной толщины, сварка пакетов из фольги;
- снижены требования чистоты свариваемых поверхностей, в связи с чем возможна сварка плакированных и оксидированных поверхностей и вообще сварка металлических изделий, поверхности которых покрыты различными изоляционными пленками;
- использование сдавливаюших сил (10...250 Н), которые вызывают незначительную деформацию поверхностей деталей в месте их соединения (вмятина, как правило, не превышает 5...10%);
- применение оборудования малой мощности и несложной конструкции. Например, для контактной точечной сварки алюминия толщиной 1 мм необходима машина мощностью 100...150 кВт, тогда как при сварке ультразвуком аналогичного соединения - всего 5...2,5 кВт.

Для получения механических колебаний высокой частоты обычно используется магнитострикционный эффект, заключающийся в изменении размеров некоторых металлов и сплавов под действием переменного магнитного поля. Для ультразвуковых преобразователей обычно используют чистый никель или железокобальтовые сплавы. Размеры магнитострикционных материалов изменяются незначительно, например, для никеля относительное магнитострикционное удлинение составляет $40 \cdot 10^{-6}$. Поэтому для увеличения амп-

литуды смещения и концентрации энергии колебаний, а также для подачи механических колебаний к месту сварки используют волноводы или концентраторы, которые в основном имеют сужающуюся форму. Эксперименты показывают, что для сварки металлов достаточно иметь волноводы с коэффициентом усиления около 5, при этом амплитуда на конце волновода при холостом ходе должна быть 20...30 мкм. Магнитострикционный преобразователь и волноводы должны быть рассчитаны на заданную частоту ультразвукового генератора.

Ультразвуковая сварка может быть (по аналогии с холодной) точечной, многоточечной, рельефной, шовной. На рис.2.25 приведены основные узлы машины для выполнения шовных соединений с помощью ультразвука. Изделие, подлежащее соединению, зажимают между вращающимся роликом волновода и холостым роликом. Высокочастотные упругие колебания передаются через волновод на ролик, который вращается вместе с волноводом. Изделие, зажатое между роликами, перемещается, и одновременно создается герметичное соединение.

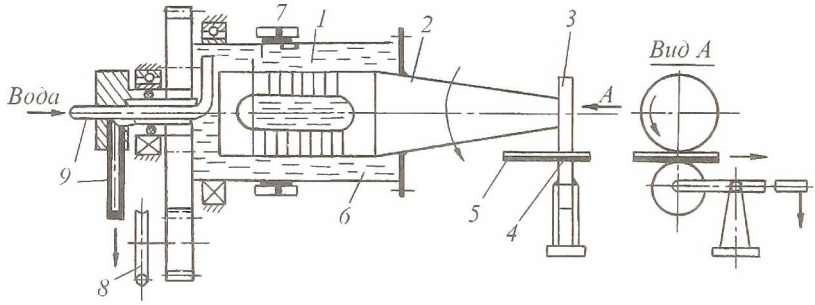


Рис.2.25. Схема установки для роликовой сварки ультразвуком:
1 - магнитострикционный преобразователь; 2 - волновод; 3 - сваривающий ролик; 4 - прижимной ролик; 5 изделие; 6 кожух преобразователя; 7 подвод тока от ультразвукового генератора; 8 - привод; 9 - подвод охлаждающей воды

Ультразвуковая сварка нашла достаточно широкое применение для соединения тонких деталей из однородных и разнородных материалов в приборостроении и радиоэлектронной промышленности. Сварка ультразвуком позволяет соединять различные металлы; хорошо свариваются ультразвуком алюминий, медь, никель, удовлетворительно свариваются высоколегированные стали. При этом прочность сварных точечных соединений достаточно высока, разрушение соединений происходит обычно с вырывом точки по контуру как при испытании на срез, так и при испытании на отрыв. С помощью ультразвука получены соединения некоторых тугоплавких металлов ниобия, тантала, молибдена и вольфрама. Однако сварные соединения вольфрама и молибдена очень хрупки.

Диффузионная сварка в вакууме (ДСВ) как технологический процесс соединения однородных и разнородных материалов предложена и разработана российским ученым Н.Ф.Казаковым. В настоящее время она запатентована практически во всех крупных странах.

Отличительные особенности диффузионной сварки.

1. Возможность сварки без расплавления, что обеспечивает отсутствие в шве литой структуры с пониженными механическими свойствами.
2. Возможность сварки материалов, не свариваемых плавлением: а) неметаллических материалов с металлическими (стекол и керамики с металлом); б) твердых сплавов со сталями; в) литейных жаропрочных сплавов; г) взаимно нерастворимых металлов, например, меди с вольфрамом или молибденом; д) ряда спеченных материалов, особенно при необходимости сохранения в шве исходной пористости (например, при изготовлении металлокерамических фильтров).
3. Возможность получения соединений, по всем показателям равноценных основному металлу.
4. Товарный вид деталей после сварки в вакууме, отсутствие необходимости дополнительной обработки.
5. Возможность сварки по развитой поверхности.
6. Возможность сварки деталей без ограничения в соотношении толщин (например, приварка фольги к массивной детали).
7. Возможность получения многослойных композиционных материалов.

Главным недостатком диффузионной сварки следует считать низкую производительность существующих установок.

Способ диффузионного соединения основан на сближении ювенильных (свободных от окисных пленок) поверхностей свариваемых деталей в вакууме при нагреве их несколько выше температуры рекристаллизации с приложением небольшой сжимающей силы и взаимной диффузии на границе раздела соединяемых поверхностей.

Температура сварки является основным параметром процесса. Она определяет условия термовакуумной очистки и образования физического контакта, активации атомов соединяемых поверхностей, лимитирует скорость и характер протекания объемного диффузионного взаимодействия. Как показывает опыт ДСВ разнообразных материалов, за оптимальную температуру сварки принимается температура, равная $(0{,}6\ldots0{,}8)T_{ПЛ}$, температуры плавления более легкоплавкого из соединяемых материалов. Температура сварки не должна превышать значений, при которых в свариваемых материалах могут происходить необратимые фазовые и структурные превращения, ухудшающие свойства сварного соединения.

Давление сжатия способствует активации поверхностей, формированию фактического контакта за счет микропластической деформации и ползучести микровыступов. Учитывая взаимосвязь между давлением сжатия и температурой сварки, максимально допустимые значения давления необходимо выбирать такими, при которых не будет наблюдаться общая пластическая деформация свариваемой детали в зоне соединения.

Время сварки является функцией основных параметров процесса температуры и давления. Время сварки определяет полноту протекания завершающего этапа стадии объемного диффузионного взаимодействия. Однако с увеличением времени сварки увеличивается общая пластическая деформация свариваемых деталей, поэтому верхний предел допустимого времени сварки целесообразно ограничивать. Нижнюю границу можно ориентировочно определять, исходя из минимально необходимого времени термовакуумной очистки соединяемых поверхностей.

Глубина вакуума и температура процесса определяют скорость и качество очистки соединяемых поверхностей. Чем выше степень вакуумирования, тем интенсивнее идет процесс дегазации деталей и объема камеры. Этим условиям отвечает глубина вакуума, которую обеспечивают серийные диффузионные установки.

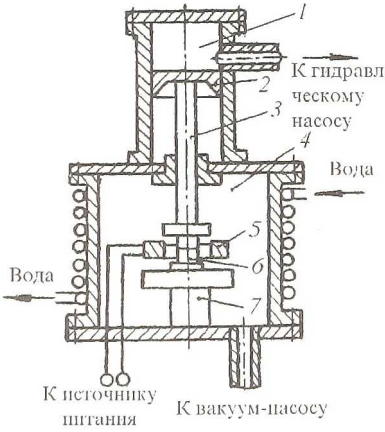


Рис.2.26. Принципиальная схема установки для диффузионной сварки в вакууме

ДСВ осуществляется в определенной технологической последовательности на специальных установках, принципиальная схема одной из них показана на рис.2.26. Детали *6* с предварительно подготовленными свариваемыми поверхностями (механически обработанные и обезжиренные) помещаются в камеру *4* и устанавливаются в центрирующем приспособлении *7*. Затем камера герметизируется и производится откачка воздуха с помощью вакуумных насосов. При достижении требуемого вакуума включается высокочастотный генератор и детали нагреваются в зоне сварки с помощью индуктора *5*. Так как индукционный нагрев носит поверхностный характер, то с целью предотвращения перегрева деталей на периферии и равномерной передачи теплоты вглубь детали тепловую мощность необходимо вводить импульсами. Скорость нагрева зависит от площади поперечного сечения свариваемых деталей в зоне контакта, она должна быть

такой, чтобы в процессе нагрева до температуры сварки градиент температур на поверхности и в центре был минимально возможным.

Очистка свариваемых поверхностей от окисных пленок, как правило, завершается за время нагрева детали до температуры сварки. При достижении температуры сварки на свариваемый комплекс через поршень *2* и шток *3* гидросистемы *1* прикладывается рабочее давление, которое поддерживается до окончания процесса. При заданной температуре и давлении производится изотермическая выдержка, в течение которой протекает процесс объемного диффузионного взаимодействия.

Последний этап цикла сварки - охлаждение свариваемого узла с заданной скоростью до температуры 323...473 К. После этого снимается давление сжатия, в камеру напускается воздух и она открывается.

Длительность всего цикла сварки зависит от массы, формы и размеров свариваемых деталей, физико-механических свойств входящих в соединение материалов.

При сварке разнородных материалов в процессе объемного взаимодействия возможно образование в контакте слоя интерметаллидов, который резко снижает прочностные характеристики соединения. В этих случаях необходимо в зону контактирования вводить промежуточную прослойку из материала, который не образует интерметаллических соединений с каждым из свариваемых материалов. Кроме того, в зависимости от соединяемой композиции прослойка может выполнять и другие функции. При соединении разнородных материалов с различными коэффициентами термического расширения для релаксации внутренних напряжений вводится прослойка из материала, имеющего промежуточное значение коэффициента термического расширения. Прослойки из более мягкого материала применяются для сварки материалов, обладающих высокой твердостью (твердые сплавы, жаропрочные стали), что облегчает условия формирования фактического контакта и ускоряет протекание последующих стадий. Возможность варьирования свариваемыми материалами и толщиной промежуточной прослойки является важным достоинством диффузионной сварки и способствует расширению области её применения.

В авиастроении сочетание жаропрочных сплавов со сталями широко применяется при изготовлении роторов малогабаритных ГТД. Рабочие колеса роторов из жаропрочных сплавов изготовляются отливкой в керамические формы. Колесо выполняется в виде ступицы с лопатками по всему периметру. Существующая технология литья исключает возможность получения цельнолитой конструкции колеса с валом, поэтому вал вытачивается из жаропрочной стали отдельно от колеса. К соединению рабочего колеса с валом предъявляются высокие требования, обусловленные тяжелыми условиями эксп-

луатации: резкие температурные перепады, наличие значительных крутящих и изгибающих моментов [7, 16]. Соединение достаточно технологично с точки зрения применения диффузионной сварки: габаритные размеры и форма узла позволяют проводить сварку на серийно выпускаемом оборудовании и обеспечивают возможность равномерной передачи силы сжатия на торцевые поверхности контакта. В зону соединения можно помещать промежуточный слой другого материала (в данном случае никелевой фольги толщиной 0,05 мм), а возможность механической обработки после сварки наружной и внутренней поверхностей вала снижает требования прецизионности получаемых соединений.

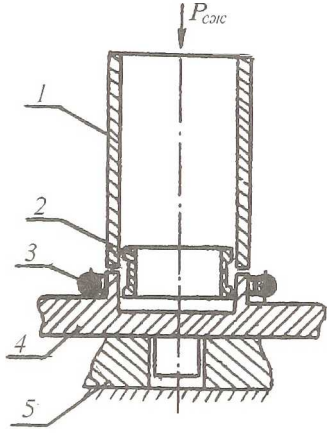


Рис.2.27. Схема сварки ротора с полым валом

Схема сборки и сварки роторов показана на рис.2.27. Такая схема обеспечивает точность сборки соединяемых деталей и жесткую их фиксацию в сварочной камере относительно системы сжатия установки и нагревателя *3* (индуктора ВЧ генератора). Колесо ротора *4* устанавливается на рабочем столе сварочной камеры и фиксируется за счет отверстия в нижней опоре приспособления *5*. Соосность вала ротора *1* и колеса обеспечивается с помощью фиксирующей втулки *2* технологического кольца. Кольцо вставляется по свободной посадке и имеет цилиндрическую проточку, благодаря которой осуществляется свободное формообразование деталей в месте соединения во время сварки. Равномерная и свободная деформация в стыке благоприятно сказывается на формировании фактического контакта и способствует повышению качества диффузионного соединения. После сварки технологическое кольцо с помощью проточки удаляется.

При расчете термического цикла сварки необходимо учитывать особенности индукционного нагрева. Нагрев до температуры сварки узлов осуществляется со скоростью 50…60 град/мин. При этом на поверхности и в центре вала в зоне стыка наблюдается температурный перепад, равный 90...100°С. Для выравнивания температуры по всей длине стыка необходима выдержка при температуре сварки в течение 4…5 мин.

Теплофизические характеристики и масса соединяемых деталей (колесо из жаропрочного сплава, вал из стали) резко различаются. Поэтому при симметричном расположении индуктора относительно стыка происходит преимущественный разогрев стального вала. Как следствие затрудняется очистка от окислов и активация поверхности жаропрочного сплава, более "инертного" с точки зрения

диффузионного взаимодействия, требующего более интенсивного термомеханического воздействия. Излишний же разогрев стального вала по длине под воздействием сил сжатия приводит к его формоизменению и даже может вызвать потерю продольной устойчивости.

Наиболее рациональным является положение, показанное на рис.2.27. Смещение его на выступающую часть колеса турбины приводит к более интенсивному разогреву в зоне сварки жаропрочного сплава, что в значительной мере способствует активации его свариваемой поверхности.

Для оценки работоспособности сварной конструкции в зависимости от условий эксплуатации необходимо определить физико-механические характеристики при кратковременных, длительных и циклических нагружениях как при температуре 20^0С, так и при рабочей температуре. Обобщающим показателем соответствия полученного соединения требованиям эксплуатации являются результаты испытаний сварного узла в составе работающего изделия.

С помощью металлографического анализа выявляются грубые несплошности (в некоторых случаях и микропоры) в зоне соединения, отличия в форме и размере зерна, миграция границы раздела, образования новых фаз в контакте промежуточной прослойки со сталью и жаропрочным сплавом. Однако возможности метода ограничены: можно проконтролировать лишь отдельные участки соединения, разрешающая способность его не позволяет выявить дефекты размером менее 1 мкм. В связи с этим металлографический анализ хотя и является обязательным элементом контроля качества, имеет вспомогательное значение и используется как дополнительный к методам прямого определения механических свойств.

Механические испытания образцов на растяжение, выполняемые при температуре 20^0С, могут служить для определения приближенных значений параметров режима сварки и не позволяют сделать заключение о работоспособности соединения в условиях эксплуатации.

Температура эксплуатации конструкций из жаропрочных сплавов, как правило, находится в пределах 623...873 К. Поэтому для оценки работоспособности соединения целесообразно проведение испытаний в диапазоне этих температур. Результаты сравнительных испытаний показали, что прочность жаропрочного сплава практически не меняется во всем диапазоне температур испытания. Прочность же стали заметно снижается, начиная с 573 К. Никель НП-2, который используется в качестве промежуточной прослойки при сварке, при температурах эксплуатации имеет прочность, не превышающую 200 МПа, однако это не снижает прочностные характеристики сварного соединения в целом. Повышение прочности "мягкой" промежуточной прослойки объясняется эффектом её контактного упрочнения. Совместная работа разнородных частей соединения приводит при нагружении составного образца к возникновению в прослойке стесненной деформации и сложного напряженного состояния, что

отражается на прочностных свойствах прослойки и всего сварного соединения. Эффект контактного упрочнения "мягкой" прослойки, а также диффузионный массообмен в контакте свариваемых материалов способствует формированию переходной зоны, не уступающей по прочности жаропрочному сплаву как при температуре 20°С, так и при температуре эксплуатации. Механические свойства металла в относительно тонкой прослойке могут отличаться от его свойств в свободном состоянии. Это определяется прежде всего локализацией в них пластических деформаций и сдерживающим действием соседних участков материала с более высоким сопротивлением деформированию.

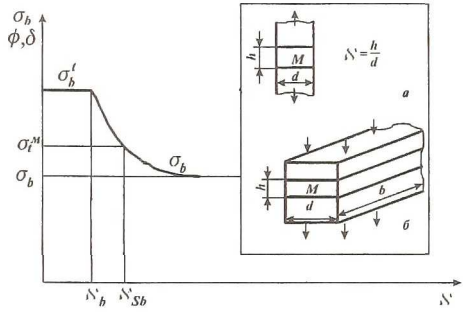


Рис.2.28. Зависимость прочности сварного соединения от относительной толщины мягкой прослойки

Свойства сварных соединений существенно зависят (рис.2.28) от относительной толщины мягкой прослойки $\aleph=h/d$, а также от степени компактности b/d и соотношения прочностных свойств металла прослойки и прилегающего более прочного (твердого) металла $k_B=\sigma_B^T/\sigma_B^M$. Физический смысл зависимости свойств прослойки от её размеров состоит в том, что развитие пластических деформаций мягкого материала сдерживается вблизи граничных поверхностей, по которым прослойка контактирует с более прочным металлом. По мере сближения граничных контактных поверхностей течение прослойки все более затрудняется, что проявляется в увеличении деформирующей и разрушающей сил (при одновременном снижении пластических свойств прослойки и изменении характера её разрушения от вязкого к хрупкому). Описанные явления получили название эффекта контактного упрочнения, так как обусловлены процессами, протекающими вблизи контактных поверхностей. На основе теоретического анализа напряженно-деформированного состояния мягкой прослойки, скрепленной с абсолютно упругим основным металлом, были выведены и экспериментально подтверждены зависимости, позволяющие оценивать прочность прослойки при различных видах деформации и способах нагружения.

На основе анализа напряженного состояния таких соединений в условиях растяжения (сжатия) О.А.Бакши получил следующие зависимости для оценки свойств мягкой прослойки, жестко скрепленной с недеформирующимися частями:

$$\sigma_T=\sigma_T^M K_\aleph;\ \sigma_B=\sigma_B^M K_\aleph\ ,$$

где σ_T предел текучести мягкой прослойки при появлении в ней развитых пластических деформаций; σ_T временное сопротивление (вязкая прочность) мягкой прослойки; $K_к$ коэффициент контактного упрочнения.

При осесимметричной деформации $K_к = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{3\sqrt{3}}$. (2.4)

Оценку вязкой прочности мягкой прослойки в случае статического растяжения можно проводить по формуле

$$\sigma_B = \sigma_B^M K_к K_P , \quad (2.5)$$

где K_P - коэффициент реализации контактного упрочнения.

Для сварных соединений контактного сечения ($b \approx d$) и сварных соединений из пластин ($b \geq 5d$) равен

$$K_к = \frac{2}{\sqrt{3}}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{4к}\right). \quad (2.6)$$

При повышении температуры прослойка никеля разупрочняется, чем можно объяснить снижение эффекта контактного упрочнения. Как показали комплексные исследования (на длительную прочность, термостойкость, выносливость), соединения с мягкой прослойкой обладают хорошей работоспособностью в условиях эксплуатации.

Опыт применения диффузионной сварки в вакууме показывает, что этот способ позволяет получать высококачественные составные конструкции из различных материалов, применяемых в авиастроении; сталей, графита, титановых сплавов, керамики (рото-

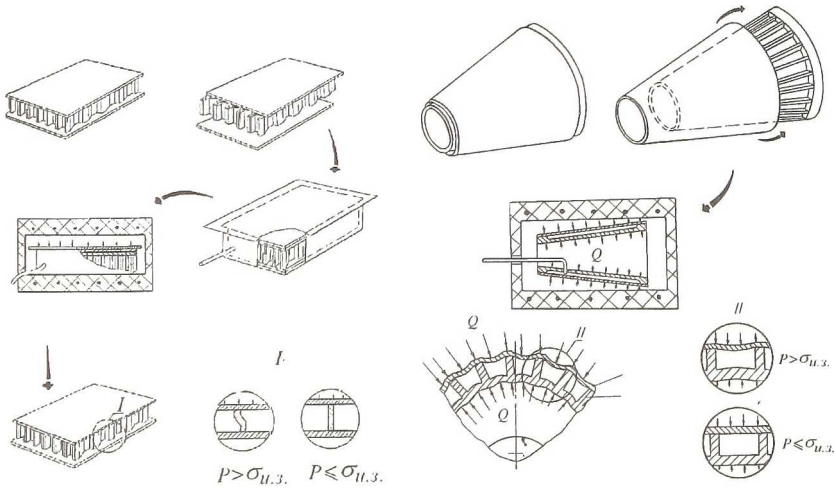


Рис.2.29. Стадии изготовления сотовых панелей (а) и теплообменников (б)

ры турбоагрегатов, модули уплотнений и др.), алюминиевых сплавов, сталей (переходники, зубчатые передачи и др.). Большой практический интерес представляет технология диффузионной сварки для изготовления титановых сотовых конструкций, теплообменников (рис.2.29, 2.30, 2.31).

Известны технологии диффузионной сварки изготовления дверей люка пассажирского самолета, обтекателей, закрылков, носков крыла, втулок несущего винта вертолета и др.

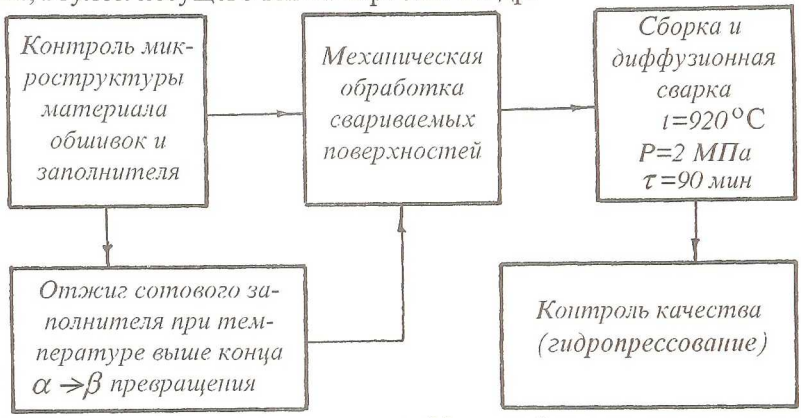


Рис.2.30. Схема технологического процесса диффузионной сварки сотовых конструкций

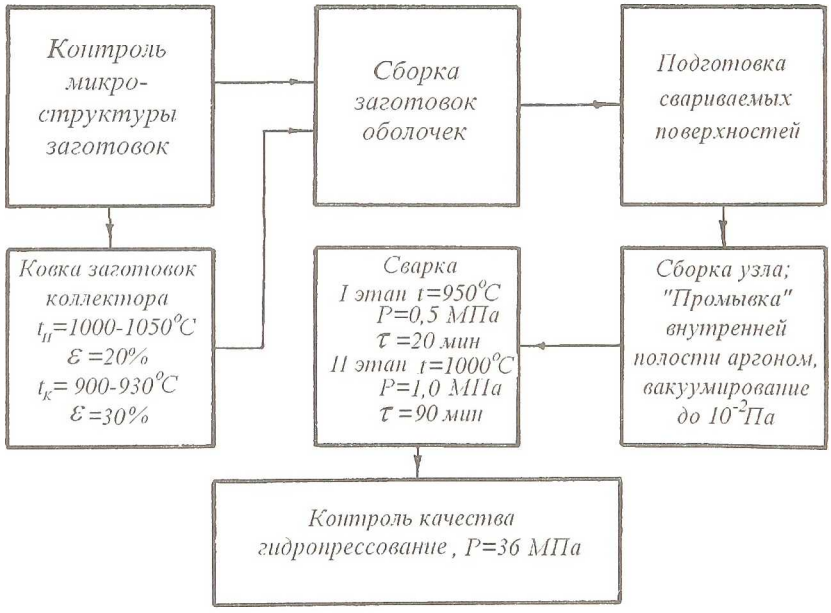


Рис. 2.31. Схема технологического процесса изготовления теплообменников с применением диффузионной сварки

2.5. Сварка плавлением. Основные способы сварки и их особенности

При сварке плавлением (рис.2.32) удаление атомов поверхностных загрязнений *3*, активация поверхностных атомов *1* соединяемого металла *2*, формирование физического контакта и химических связей между атомами металла осуществляются в результате местного расплавления соединяемых поверхностей и образования общей сварочной ванны. В жидком металле связи между атомами сохраняются, в том числе и на межфазной границе *4*, образующейся при расплавлении кромок соединяемых частей металла. Поэтому для образования непрерывных межатомных связей достаточно появления общей сварочной ванны *5*. При этом исчезают границы раздела между соединяемыми поверхностями. Таким образом, образование общей сварочной ванны является основным и обязательным этапом формирования соединений при сварке плавлением [62].

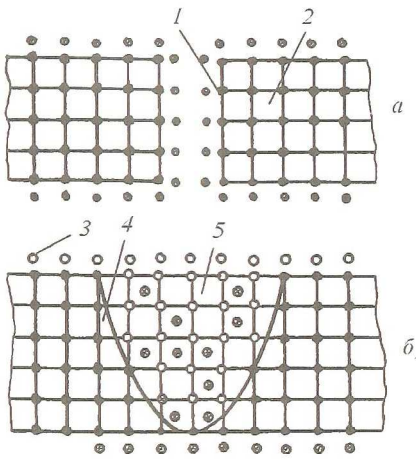


Рис.2.32. Схема образования соединения при сварке плавлением

Процесс сварки плавлением это комплекс одновременно протекающих физических процессов, основными из которых являются: плавление кромок соединяемых деталей и во многих случаях плавление электродной или присадочной проволоки в зоне сварки; металлургические процессы, протекающие в расплавленном металле; тепловое воздействие на основной металл в околошовных зонах, кристаллизация расплавленного металла и формирование металла шва.

Для реализации сварки плавлением используются источники энергии различного вида. Наибольшее распространение в производстве ЛА получили процессы сварки, в которых для нагрева применяются: электрическая дуга, плазменная струя, электронный луч. Менее распространены газовое пламя, световой и лазерный лучи, электрорасплав, реакция термита и др.

Электрическая дуга, плазменная струя, газовое пламя, электронный и фотонный луч относятся к так называемым нормально-круговым источникам теплоты. Например, на рис.2.33, а изображена схема сварочной дуги.

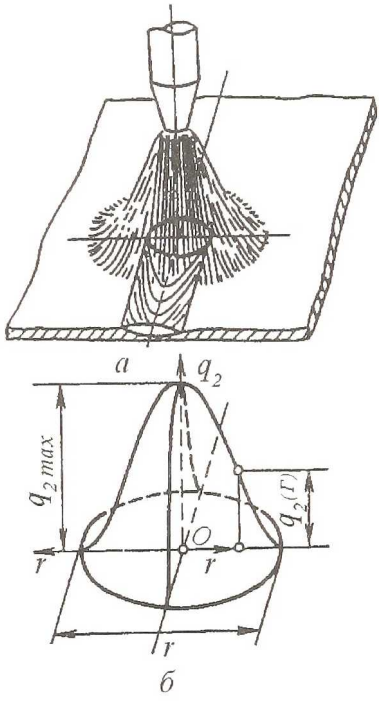


Рис.2.33. Схема сварочной дуги как источника теплоты

Источники теплоты, применяемые для сварки, характеризуются эффективной тепловой мощностью, распределением выделяемой теплоты по поверхности или объему изделия и изменением этого распределения во времени.

Эффективная тепловая мощность источника q есть количество теплоты, введенное за единицу времени в металл изделия и затраченное на его нагрев: $q=\eta_u \cdot Q$, где Q полная затраченная мощность источника, η_u эффективный КПД процесса нагрева. Он характеризует эффективность процесса выделения теплоты и теплообмена между источником и свариваемым изделием. Распределение удельного теплового потока q_2 по радиусу пятна нагрева приближенно описывают нормальным законом распределения вероятности Гаусса (рис.2.33, б):

$$q_2(r) = q_{2\max} e^{-kr^2},$$

где q_{2max} наибольший удельный тепловой поток в центре пятна нагрева; k коэффициент сосредоточенности удельного теплового потока, $см^{-2}$; r - расстояние от оси источника, см.

В табл.2.1 приведены данные по плотности энергии различных источников теплоты и минимальной площади нагрева.

Таблица 2.1.

Плотность энергии различных источников тепла и минимальная площадь пятна нагрева

Источник теплоты	Минимальная площадь пятна нагрева, $см^2$	Максимальная плотность энергии, $Вт/м^2$
Ацетилено-кислородное пламя	10^{-2}	$5 \cdot 10^8$
Сварочная дуга	10^{-3}	10^9
Электронный луч Луч оптического квантового генератора	10^{-7}	$5 \cdot 10^{12}$

Теплота местного источника, сосредоточенного на небольшом участке поверхности или в малом объеме изделия, сравнительно быстро нагревает металл до высокой температуры. Вследствие теплопроводности металла и теплообмена на поверхности теплота отводится от области приложения источника, местный нагрев до заданой температуры замедляется и снижается его эффективность.

Располагая характеристиками источников теплоты, можно рассчитать процесс распространения её в металле. Процесс распространения теплоты при сварке можно разделить на три стадии:

- теплонасыщение, когда температура в поле, перемещающемся вместе с источником теплоты, продолжает нарастать;
- предельное квазистационарное состояние, когда подвижное поле практически устанавливается;
- выравнивание температуры по окончании сварки.

Температура любой точки тела по мере приближения к ней температурного поля начинает повышаться, достигает определенного максимума и при дальнейшем перемещении температурного поля начинает понижаться, стремясь к температуре окружающей среды. Такое изменение во времени температуры данной точки тела называется термическим циклом. Графически термический цикл показан на рис.2.34.

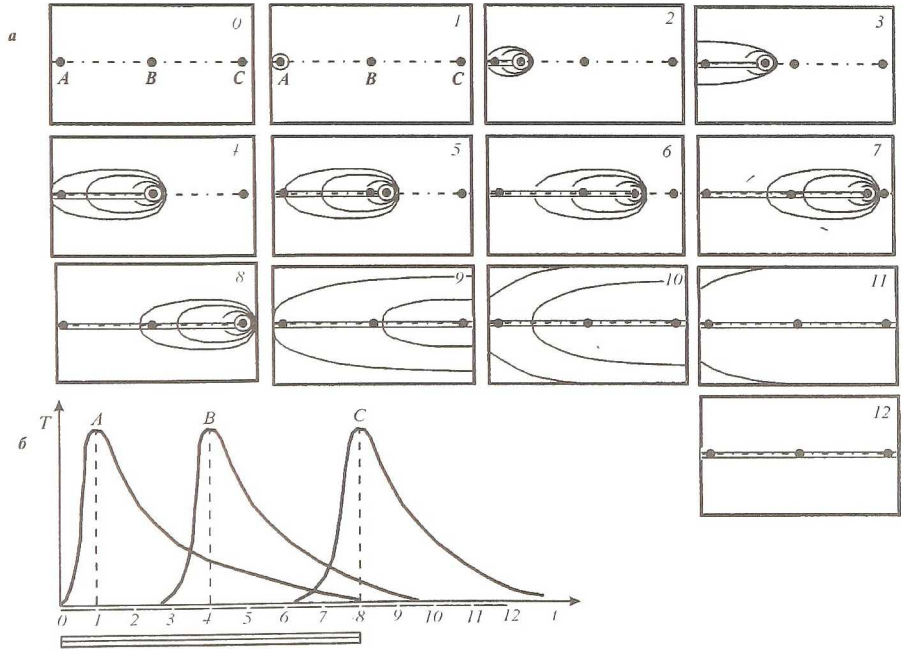


Рис.2.34. Процесс распределения теплоты при сварке листов встык:
а мгновенные температурные поля для моментов времени 0...12; б - изменение температуры в точках А, В и С со временем

Начальному периоду времени действия источника теплоты соответствует неустановившееся температурное поле. В этот отрезок времени непрерывно увеличиваются размеры нагреваемой области и повышается температура каждой её точки, стремясь достигнуть предельного значения.

С течением времени происходит насыщение металла теплом, стабилизируются размеры нагретой области и температуры отдельных точек этой области. Вокруг источника тепла устанавливается температурное поле постоянных параметров, передвигающееся вместе с источником. Это предельное состояние нагрева сохраняется до момента прекращения действия источника тепла.

Конечные свойства сварного соединения зависят от процессов, обеспечивающих формирование металла шва и оказывающих влияние на область металла, прилегающую к линии сплавления, называемую зоной термического влияния (рис.2.35), где А металл шва, имеющий литую структуру, свойства которого зависят от состава свариваемого металла, условий защиты расплава от окружающей атмосферы, металлургических процессов, происходящих в расплаве сварочной ванны, условий, в которых проходит охлаждение и кристаллизация металла шва; Б - зона термического влияния, т.е. зона основного металла, прилегающая к металлу шва, в которой наблюдается изменение исходных свойств свариваемого (основного) металла в результате воздействия термического цикла сварки. Характер изменения свойств зависит, с одной стороны, от свойств свариваемого металла, с другой - от термического цикла сварки.

Процессы, протекающие в зоне термического влияния, часто оценивают по диаграмме состояния и характеру распределения максимальной температуры (T_{max}). Так, например, при сварке сплава системы железо-углерод состава C_o можно выделить следующие области [62]:

1 - высокотемпературная область, где металл в процессе сварки нагревался выше температуры солидуса ($T_C < T_{max} < T_Л$). В этой области в процессе сварки металл находился в твердо-жидком состоянии. Как правило, эта область является наиболее слабым участком сварного соединения, вследствие появления химической неоднородности и возможности образования горячих трещин. Горячие трещины хрупкие межкристаллические разрушения металла шва и околошовной зоны, возникающие в твердо-жидком состоянии в процессе кристаллизации, а также при высоких температурах в твердом состоянии. Причины их образования при сварке: низкая пластичность и прочность металла, находящегося в двухфазном состоянии; объемная усадка металла при кристаллизации и линейное сокращение нагретого металла при охлаждении сварного соединения.

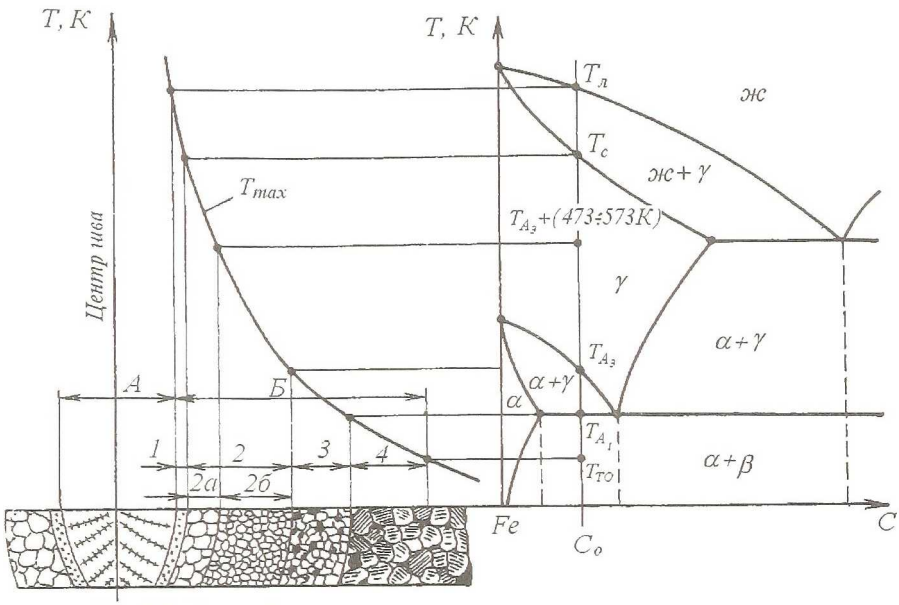


Рис.2.35. Схема формирования сварного соединения при сварке стали

2 - область полной перекристаллизации, где температура превышала температуры завершения фазового превращения ($T_{A_3} < T_{max} < T_C$). Она включает в себя два участка: участок перегрева 2а, где максимальная температура превышает температуру начала интенсивного роста зерна аустенита (T_{A_3}+(473-573 К)$< T_{max} < T_{A_3}$) и участок перекристаллизации, где процессы превращения феррита в аустенит завершаются полностью ($T_{A_3} < T_{max} < T_{A_3}$+(473-573 К)).

Изменения, протекающие в зонах 1 и 2, часто называемых околошовной зоной, наиболее существенны и в большинстве случаев оказываются решающими при оценке свариваемости металлов. К таким изменениям можно отнести снижение пластичности и ударной вязкости вследствие роста зерна из-за перегрева металла, полной или частичной закалки, а также образования холодных трещин.

Холодные трещины локальные межкристаллические разрушения, образующиеся в сварных соединениях преимущественно при низких температурах. Причины их образования при сварке: охрупчивание металла вследствие протекания закалочных процессов при быстром его охлаждении и образовании метастабильных структур мартенситного типа; остаточные напряжения, возникающие в сварных соединениях.

3 - область неполной перекристаллизации ($T_{A_1} < T_{max} < T_{A_3}$), где максимальная температура превышала температуру начала фазового превращения. Структурные изменения в этой области оказывают меньшее влияние на свойства свариваемого металла, чем в околошовной зоне, но и здесь возможно разупрочнение металла.

4 - область, где максимальная температура превышала температуру последней перед сваркой термической обработки ($T_{T0} < T_{max}$). Свойства металла в этой области после сварки зависят от состояния, в котором находился металл до сварки. При сварке отожженной стали изменения свойств металла не происходит. Если сталь находилась в деформированном состоянии, то происходит рост зерна и изменение прочности и твердости металла вследствие рекристаллизации. При сварке закаленной стали неизбежно разупрочнение металла, вызванное отпуском.

Наибольшее распространение в машиностроении получила **электродуговая сварка**. Рассмотрим подробнее особенности электродуговой сварки.

Электрической дугой называется продолжительный разряд электрического тока между двумя электродами, происходящий в газовой среде. Электрическая дуга, используемая для сварки металлов, называется сварочной дугой. Такая дуга в большинстве случаев горит между электродом и изделием, т.е. является дугой прямого действия.

Дуга прямого действия постоянного тока, горящая между металлическим электродом (катодом) и свариваемым металлом (анодом), имет несколько ясно различимых областей (рис.2.36). Электропроводный газовый канал, соединяющий электроды, имеет форму усеченного конуса или цилиндра. Его свойства на различных расстояниях от электродов неодинаковы. Тонкие слои газа, примыкающие к электродам, имеют сравнительно низкую температуру. В зависимости от полярности электрода, к которому они примыкают, эти слои называются катодной *2* и анодной *4* областями дуги.

Протяженность катодной области l_k определяется длиной свободного пробега нейтральных атомов и составляет примерно 10^{-5} см. Протяженность анодной области l_a определяется длиной свободного пробега электрона и составляет примерно 10^{-3} см. Между приэлектродными областями располагается наиболее протяженная, высокотемпературная область разряда - столб дуги l_c *3*.

На поверхности катода и анода образуются пятна, называемые, соответственно, катодное *1* и анодное *5* пятно, являющиеся основаниями столба дуги, через которые проходит весь сварочный ток. Электродные пятна выделяются яркостью свечения

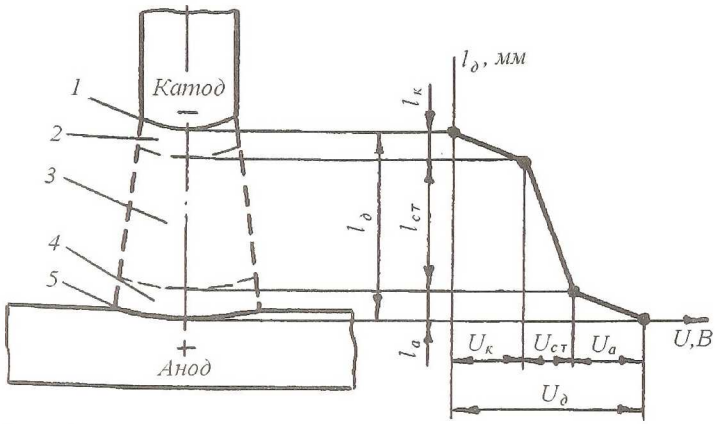


Рис.2.36. Строение электрической сварочной дуги и распределение напряжений на её участках

при сравнительно невысокой их температуре (2600…3200 К). Температура в столбе дуги достигается 6000…8000 К.

Общая длина сварочной дуги $l_д$ равна сумме длин всех трех её областей ($l_д=l_a+l_k$) и для реальных условий составляет 2…6 мм.

Общее напряжение сварочной дуги соответственно слагается из суммы падений напряжений в отдельных областях дуги $U_l=U_a+U_K+U_{CT}$ и находится в пределах от 20 до 40 В. Зависимость напряжения в сварочной дуге от её длины описывается уравнением $U_д=a+bl_д$, где a - сумма падений напряжений в катодной и анодной областях, В; $l_д$ - длина столба дуги, мм; b - удельное падение напряжения в дуге, отнесенное к 1 мм длины столба дуги, В/мм.

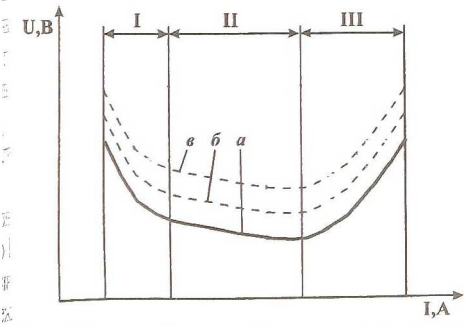


Рис.2.37. Статические вольт-амперные характе-ристики:
а - для короткой; б - средней; в - длинной сварочной дуги

Одной из основных характеристик электрического дугового разряда является статическая вольт-амперная характеристика зависимость напряжения дуги при постоянной ее длине от силы тока в ней (рис.2.37).

С увеличением длины дуги напряжение увеличивается и кривая статической вольт-амперной характеристики дуги поднимается выше, примерно сохраняя при этом свою форму (кривые, а, б, в). На ней различают три области: падающую I, жесткую (почти горизонтальную) II и возрастающую III. В зависимости от условий горения дуги ей соответствует один из

участков характеристики. При ручной дуговой сварке покрытыми электродами, сварке в защитных газах неплавящимся электродом и сварке под флюсом на сравнительно небольших плотностях тока характеристика дуги будет вначале падающей,а при увеличении тока полностью перейдет в жесткую. При этом с увеличением сварочного тока пропорционально увеличиваются поперечное сечение столба дуги и площади поперечного сечения анодного и катодного пятен. Плотность тока и напряжение дуги остаются постоянными.

При сварке под флюсом и в защитных газах тонкой электродной проволокой на больших плотностях тока характеристика дуги становится возрастающей. Это объясняется тем, что диаметры катодного и анодного пятен становятся равными диаметру электрода и больше увеличиваться не могут. В дуговом промежутке наступает полная ионизация газовых молекул и дальнейшее увеличение сварочного тока может происходить лишь за счет увеличения скорости движения электронов и ионов, т. е. за счет увеличения напряженности электрического поля. Поэтому для дальнейшего увеличения сварочного тока требуется увеличение напряжения дуги.

Сварочная дуга представляет собой мощный концентрированный источник теплоты. Почти вся электрическая энергия, потребляемая дугой, превращается в тепловую. Полная тепловая мощность дуги $Q = I_{св}U_д$ (Дж/с) зависит от силы сварочного тока $I_{св}$ (А) и напряжения дуги $U_д$ (В)

Следует отметить, что не вся теплота дуги затрачивается на нагрев и плавление металла. Часть её бесполезно расходуется на нагрев окружающего воздуха или защитного газа, радиационное излучение и т.д. В связи с этим эффективная тепловая мощность дуги $q_{эф}$ (Дж/с) (та часть теплоты сварочной дуги, которая вводится непосредственно в изделие) определяется следующим соотношением:

$q_{эф}=Q\cdot\eta=I_{св}U_д\eta$,

где η коэффициент полезного действия (КПД) процесса нагрева изделия сварочной дугой, определяемый опытным путем.

Коэффициент η зависит от способа сварки, материала электрода, состава покрытия или флюса и ряда других факторов. Например, при сварке открытой дугой угольным или вольфрамовых электродом он составляет в среднем 0,6; при сварке покрытыми (качественными) электродами около 0,75; при сварке под флюсом 0,8 и более.

При образовании сварного шва эффективная тепловая мощность дуги расходуется на расплавление основного и присадочного металлов.

Производительность процесса сварки оценивают по количеству расплавленного и наплавленного металла. Количество расплавленного металла (G_P) электродной проволоки определяют по формуле $G_P = \alpha_P I_{CB} t_0$, где I_{CB} сила сварочного тока, А; t_0 -

основное время сварки (время горения дуги), ч; α_P коэффициент расплавления, г/(А·ч).

Коэффициентом расплавления называется количество расплавленного в течение 1 часа электродного металла, приходящегося на сварочный ток силой 1 А.

Количество наплавленного металла можно найти из соотношения: $G_P = \alpha_H I_{CB} t_0$, где α_H - коэффициент наплавки, г/(А·ч).

Коэффициентом наплавки называется количество наплавленного в течение 1 часа электродного металла, приходящегося на сварочный ток силой 1 А. При сварке покрытыми электродами коэффициент наплавки составляет 6...12 г/(А·ч), под флюсом 10...16 г/(А·ч), в углекислом газе 12...20 г/(А·ч), при электрошлаковой сварке - 19...22 г/(А·ч).

Часть расплавившегося электродного металла не участвует в образовании наплавленного металла шва, а идет на угар, разбрызгивание и испарение. Коэффициент, характеризующий потери электродного металла, выражается в процентах и определяется по формуле $a = \frac{G_P - G_H}{G_H} 100\% = \frac{\alpha_P - \alpha_H}{\alpha_H} 100\%$. Значение этого коэффициента зависит от вида и режима сварки. Так, при сварке покрытыми электродами он составляет 5...10%, в защитных газах 3...6%, под флюсом и при электрошлаковой сварке - 1...5%.

В сварочную систему при дуговой сварке входят источник питания и сварочная дуга. Требуемое качество сварного соединения обеспечивается в том случае, если система во время сварки работает устойчиво, стабильно во всех её звеньях и, прежде всего, если обеспечивается устойчивое горение дуги.

Для обеспечения устойчивости горения дуги источники питания для дуговой сварки должны удовлетворять следующим требованиям: 1) иметь напряжение холостого хода U_{XX}, т.е. напряжение на зажимах источника тока при разомкнутой сварочной цепи, достаточное для легкого возбуждения дуги и устойчивого её горения, но не превышающее норм безопасности работы, т.е. не более 80...90 В; 2) обладать достаточной мощностью для выполнения сварочных работ; 3) обеспечивать ток короткого замыкания I_{K3}, не превышающий установленных значений, чтобы источник тока выдерживал продолжительные короткие замыкания сварочной цепи без перегрева и повреждения обмотки, при достаточной стабильности процесса; 4) обладать хорошими динамическими свойствами, т.е. обеспечивать быстрое восстановление напряжения дуги после коротких замыканий; 5) иметь устройства для плавного регулирования силы сварочного тока; 6) обладать требуемой внешней характеристикой (рис.2.38) [62].

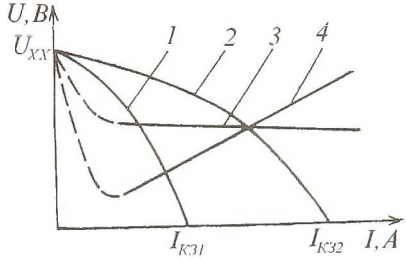


Рис.2.38. Внешние характеристики источников питания сварочной дуги

Внешней характеристикой источника питания называется зависимость между напряжением на его выходных зажимах и током в сварочной цепи. Внешние характеристики источников питания могут быть: крутопадающими *1*, пологопадающими *2*, жесткими *3* и возрастающими *4*. Для питания дуги с падающей или жесткой характеристикой применяют источники питания с крутопадающей или пологопадающей внешней характеристикой. Для питания дуги с возрастающей характеристикой применяют источники тока с жесткой или возрастающей внешней характеристикой.

Для питания сварочной дуги применяют источники переменного (сварочные трансформаторы) и постоянного тока (сварочные выпрямители и сварочные генераторы). Сварочные трансформаторы, благодаря своим технико-экономическим показателям, имеют преимущества по сравнению с источниками постоянного тока. Они проще в эксплуатации, долговечнее, обладают более высоким КПД. Источники постоянного тока предпочтительнее в технологическом отношении. При их применении повышается устойчивость горения дуги, улучшаются условия сварки в различных пространственных положениях и др.

Для стабильной работы системы источник питания сварочная дуга требуется равенство тока и напряжения дуги току и напряжению источника питания. Кроме того, необходимо соответствие внешней вольт-амперной характеристики источника и статической вольт-амперной характеристики дуги. В точке их пересечения (точка В, рис.2.39) наблюдается равенство значений тока и напряжения источника питания и сварочной дуги. Условие устойчивого горения дуги в дифференциальной форме имеет следующий вид:

$$\frac{\partial U_д}{\partial J} > \frac{\partial U_и}{\partial J} \qquad (2.7)$$

или

$$k_у = \left(\frac{\partial U_д}{\partial J} - \frac{\partial U_и}{\partial J} \right) > 0 \ , \qquad (2.8)$$

где $U_д$, $U_и$ - напряжение дуги и источника в установившемся режиме; $I_д$, $I_и$ ток дуги и источника в установившемся режиме; $k_у$ - коэффициент динамической устойчивости системы источник питания - сварочная дуга.

Анализ зависимостей (2.7) и (2.8) позволяет сделать следующие выводы [62].

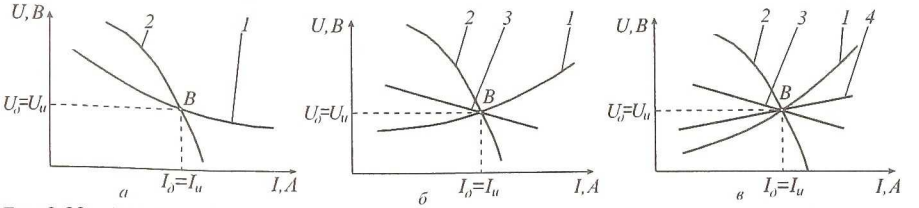


Рис.2.39. Варианты соответствия внешней вольт-амперной характеристики дуги различным типам внешних характеристик источника, при которых выполняется условие устойчивого горения дуги

1. Если статическая вольт-амперная характеристика дуги *1* (рис.2.39, а) падающая ($\partial U_д/\partial I<0$), то для устойчивого горения дуги требуются источники питания с такими падающими внешними характеристиками *2* ($\partial U_и/\partial I<0$), крутизна падения которых в рабочей точке В больше, чем у статической характеристики дуги. В этом случае $k_у>0$.
2. При наличии жесткой статической вольт-амперной характеристики дуги *1* (рис.2.39, б) источник питания и в этом случае должен иметь падающую внешнюю характеристику ($\partial U_и/\partial I<0$). Крутизна её падения в точке В может быть любой: $k_у>0$ (*2,3*).
3. Для устойчивого горения дуги с возрастающей статической вольт-амперной характеристикой *1* (рис.2.39, в) ($\partial U_д/\partial I>0$) принципиально могут быть использованы источники питания с любой внешней характеристикой (кривые *2, 3, 4*). Исключение составляют источники с возрастающими вольт-амперными характеристиками, крутизна подъема которых в рабочей точке В больше, чем крутизна подъема статической характеристики дуги. В этом случае также будет выполняться условие устойчивого горения дуги $k_у>1$.
4. Источники питания с падающими вольт-амперными характеристиками принципиально пригодны для многих способов сварки.
5. Источники питания с жесткими и возрастающими вольт-амперными характеристиками имеют ограниченное применение и могут быть использованы только для сварочных дуг с возрастающей статической вольт-амперной характеристикой.

Окончательно внешнюю характеристику источника выбирают исходя из анализа конкретных условий ведения процесса дуговой сварки.

В настоящее время при изготовлении сварных конструкций широко применяется ручная дуговая сварка сварка плавящимися штучными электродами, при которой подача электрода и перемещение дуги вдоль свариваемых кромок производятся вручную. Схема процесса показана на рис.2.40. Сварочная дуга *1* горит между

металлическим стержнем электрода *2* и основным металлом *3*. Под действием теплоты дуги металл электрода и основной металл плавятся, образуя металлическую сварочную ванну *4*. Капли жидкого металла *5* с торца расплавляемого электродного стержня переносятся в ванну через дуговой промежуток. Вместе со стержнем плавится покрытие электрода *6*, образуя газовую защиту *7* вокруг дуги и жидкую шлаковую ванну на поверхности расплавленного металла. По мере движения дуги металл сварочной ванны затвердевает, и образуется сварной шов *8*. Жидкий шлак по мере остывания образует на поверхности шва твердую шлаковую корку *9*, которая удаляется после остывания шва. Для обеспечения заданного состава и свойств металла шва сварку выполняют покрытыми электродами, к которым предъявляют специальные требования.

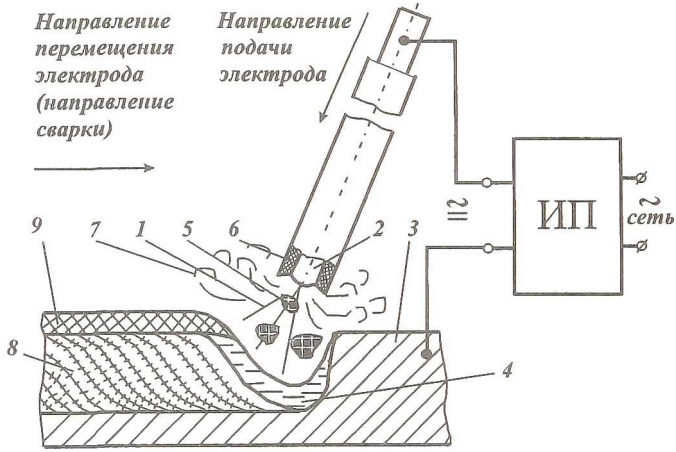


Рис.2.40. Схема ручной дуговой сварки покрытыми электродами; ИП - источник питания

Стальную сварочную проволоку, предназначенную для всех видов сварки плавлением и изготовления электродов, выпускают диаметром от 0,3 до 12 мм.

Покрытие электрода - смесь веществ для обеспечения ионизации дугового промежутка, защиты от вредного воздействия воздуха и металлургической обработки сварочной ванны. В покрытие входят следующие компоненты: ионизирующие (стабилизирующие), газообразующие, шлакообразующие, легирующие, раскислители, связующие и формовочные добавки.

Для повышения производительности процесса сварки в состав покрытия добавляют железный порошок до 60% массы покрытия.

По виду покрытия электроды классифицируют: с кислым покрытием (А); основным (Б); целлюлозным (Ц); рутиловым (Р); смешанного вида и прочими видами покрытий. Условное обозначение

электродов для ручной дуговой сварки состоит из обозначения марки электрода, его типа, диаметра стержня и типа покрытия. Например, условное обозначение электрода для сварки конструкционных сталей

Э46А-УОНИ 13/45-3,0-УД2

Е432(5)-Б10

В соответствии с ГОСТ 9467-75 это обозначение расшифровывается: Э46А тип электрода; УОНИ-13/45 марка электрода; 3,0 диаметр стержня, мм; У электроды для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей; Д2 толщина покрытия электрода; Е435(5) характеристики наплавленного данным электродом металла; 43 временное сопротивление разрыву, не менее 430 МПа; 2 - относительное удлинение, не менее 22%; 5 ударная вязкость, не менее 0,34 МДж/м^2 при температуре 233 К; Б основное покрытие; 1 электрод может быть использован для сварки в любых пространственных положениях; 0 электрод предназначен для сварки на постоянном токе обратной полярности.

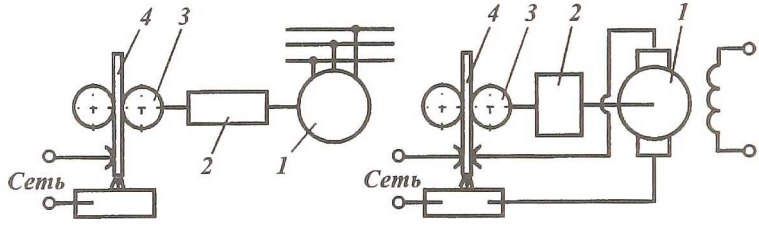
Под режимом сварки понимается совокупность ряда факторов (параметров) сварочного процесса, обеспечивающих устойчивое горение дуги и получение сварных швов заданных размеров, формы и качества. При ручной дуговой сварке покрытыми электродами к ним относят: диаметр электрода ($d_э$), силу сварочного тока ($I_{св}$), напряжение дуги ($U_д$), род и полярность сварочного тока, скорость сварки ($v_{св}$), положение шва в пространстве, необходимость подогрева и последующей термообработки.

Дуга может возбуждаться двумя приемами: касанием впритык и отводом перпендикулярно вверх электрода от поверхности изделия или "чирканием" электродом, как спичкой. Второй способ удобнее, но неприемлем в узких и неудобных местах.

В процессе сварки необходимо поддерживать определенную длину дуги, которая зависит от марки и диаметра электрода. Ориентировочно нормальная длина дуги должна быть в пределах $l_д$=(0,5-1,1)$d_э$, где $l_д$ - длина дуги, мм; $d_э$ - диаметр электрода, мм. Длина дуги оказывает существенное влияние на качество сварного шва и его геометрическую форму. Длинная дуга способствует более интенсивному окислению и азотированию расплавленного металла, увеличивает разбрызгивание, приводит к пористости металла шва.

В производстве ЛА наибольшее распространение получили автоматические способы электродуговой сварки. В соответствии с ГОСТ 2601-74 автоматической называют сварку, при которой подача плавящегося электрода и перемещение дуги вдоль свариваемых кромок механизированы. Для перемещения сварочной дуги вдоль свариваемых кромок возможно два варианта: во-первых, это перемещение сварочной горелки с помощью сварочного трактора; во-вторых, перемещение изделия относительно сварочной горелки.

Устойчивый процесс сварки и хорошее качество сварного шва обеспечиваются правильным выбором и поддерживанием параметров режима сварки на заданном уровне. В современных сварочных автоматах используются два принципа регулирования режима сварки: саморегулирование длины дуги и принудительное автоматическое регулирование длины дуги. Большинство сварочных аппаратов для дуговой сварки под флюсом работает по принципу саморегулирования длины дуги. Автоматы, использующие этот принцип, имеют постоянную скорость подачи электродной проволоки, равную скорости её плавления (рис.2.41, а). В этих аппаратах асинхронный двигатель трехфазного тока *1*, имеющий неизменную частоту вращения, через редуктор *2* вращает ролик *3*, который с постоянной скоростью подает электродную проволоку *4* в зону дуги. Одним из преимуществ сварочного аппарата с постоянной скоростью подачи электродной проволоки является простота их электрической схемы и надежность работы.



а б

Рис.2.41. Принципиальные электрические схемы сварочных головок: а постоянная скорость подачи электродной проволоки; б автоматическое регулирование скорости подачи электродной проволоки

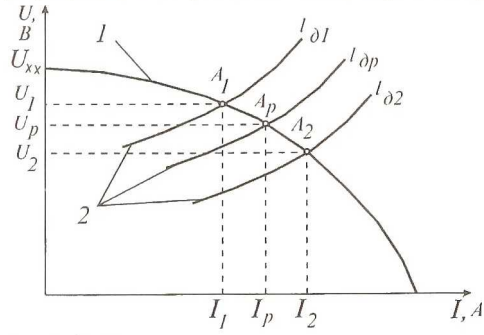


Рис.2.42. Изменение параметров режима сварки в зависимости от длины дуги

Точка А (рис.2.42) точка устойчивого горения дуги, которой соответствует рабочий ток I_P, рабочее напряжение U_P и длина дуги $l_{дp}$. Предположим, что длина дуги по каким либо причинам увеличилась и стала равна $l_{д1}$. Рабочая точка в этом случае переместится в точку A_2. Сила рабочего тока уменьшится ($I_1<I_P$). В результате этого скорость плавления электродной проволоки также уменьшится. Поскольку скорость подачи электродной проволоки осталась прежней, скорость плавления электрода и скорость его подачи уравняются. В случае уменьшения длины дуги до $l_{д2}$ рабочая точка переместится в точку A_2;

произойдет увеличение сварочного тока ($I_2 > I_P$), вследствие чего скорость плавления электродной проволоки увеличится. Но так как скорость подачи электродной проволоки остается постоянной, то через некоторый промежуток времени длина дуги восстановит свое равновесное значение.

Автоматическое регулирование длины дуги основано на изменении скорости подачи электродной проволоки в зависимости от напряжения дуги. На рис.2.41, б приведена упрощенная электрическая схема сварочной головки, работающей по принципу автоматического регулирования.

Электродвигатель постоянного тока *1* через редуктор *2* вращает ролик *3*, который подает электродную проволоку *4* в зону горения дуги. На обмотку якоря электродвигателя подается напряжение дуги. Если по каким-либо причинам длина дуги возрастает, то возрастает и напряжение дуги, подаваемое на якорь. Вследствие этого якорь начинает вращаться быстрее, скорость подачи проволоки увеличивается и длина дуги восстанавливается до первоначального значения. Наоборот, если по каким-либо причинам длина дуги уменьшается, то напряжение на ней упадет. Скорость вращения якоря уменьшается, проволока начнет подаваться медленнее, и длина дуги вновь приобретет первоначальное значение.

Автоматическая дуговая сварка под флюсом осуществляется с использованием плавящегося электрода и введением в зону дуги для создания защиты гранулированного флюса, слой которого полностью закрывает дугу и, частично расплавляясь, создает вокруг нее подвижную защитную оболочку, перемещающуюся вместе с дугой.

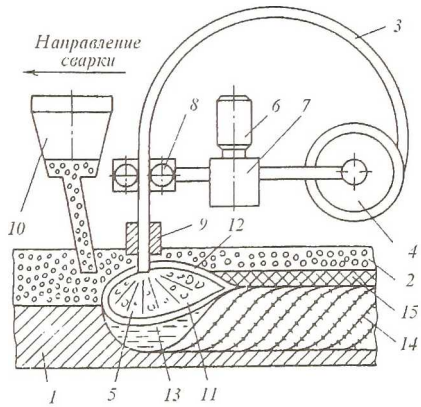


Рис.2.43. Схема автоматической дуговой сварки под флюсом

Основная особенность процесса автоматической сварки под флюсом состоит в том, что сварочная дуга *5* (рис.2.43) горит не на открытом воздухе, а под слоем флюса *2* между электродной проволокой *3*, поступающей из бухты *4*, и свариваемым изделием *1*. Электродвигатель *6* через редуктор *7* вращает подающие ролики *8*, которые обеспечивают поступление проволоки в зону горения дуги со скоростью её плавления. Сварочный ток подводится через токоподводящий мундштук (или токоподводящие ролики) *9*. Флюс под действием собственного веса поступает из бункера *10* в зону сварки.

За счет теплоты электрической дуги расплавляются основной металл, электродная проволока и часть флюса, непосредственно прилегающего к зоне сварки.

Расплавленный флюс образует плотную оболочку флюсогазовый пузырь *11*, над которым находится слой жидкого шлака *12*. Флюсогазовый пузырь надежно защищает расплавленный металл от вредного воздействия кислорода и азота воздуха, а также препятствует его разбрызгиванию. Во флюсогазовом пузыре создается достаточно большое давление газов, которые оттесняют часть жидкого металла сварочной ванны *13* в противоположную направлению сварки сторону. После остывания жидкого металла сварочной ванны образуется сварной шов *14*, покрытый затвердевшей коркой шлака *15*. После окончания сварки и охлаждения металла шва шлаковая корка легко отделяется.

Автоматическая дуговая сварка под флюсом имеет ряд преимуществ перед другими видами сварки плавлением:

1. Высокая производительность благодаря применению больших токов, а также почти полному отсутствию потерь металла на угар и разбрызгивание. Увеличение плотности тока за счет приближения токоподвода к зоне сварки позволяет сваривать металл значительной толщины без разделки кромок и увеличивать количество металла, наплавленного в единицу времени. Коэффициент наплавки ($\alpha_н$) при сварке под флюсом составляет 14...18 г/(А·ч) и более, против 8...12 г/(А·ч) при ручной дуговой сварке покрытыми электродами. Наличие плотного слоя флюса вокруг зоны сварки предотвращает выдувание жидкого металла из сварочной ванны и сводит потери на угар и разбрызгивание до 1...3%.
2. Высокое качество сварных швов, что достигается надежной защитой металла шва от воздействия кислорода и азота воздуха, однородностью металла шва по химическому составу, улучшением формы шва и постоянства его размеров. Одновременно обеспечивается меньшая вероятность образования непроваров, подрезов и других дефектов формирования шва и отсутствуют перерывы в процессе сварки, вызываемые сменой электрода.
3. Автоматизация процесса путем механизированной подачи сварочной проволоки в зону сварки и механизированного перемещения сварочной дуги по свариваемому стыку.

Недостатками процесса сварки под флюсом являются возможность сварки только в нижнем положении (наклон изделия до 15°), трудности применения в монтажных условиях и на коротких швах.

Автоматическую сварку под флюсом применяют в заводских и монтажных условиях для сварки в нижнем положении металла толщиной 2...100 мм. Сваривают стали различного состава, медь, титан, алюминий и сплавы на их основе.

Способы **электродуговой сварки в защитных газах** в настоящее время являются основными при изготовлении и сборке-сварке различных деталей и агрегатов ЛА.

Сущностью и отличительной особенностью этого вида дуговой сварки является защита расплавленного и нагретого до высокой температуры основного металла от вредного влияния воздуха защитными газами.

Защитные газы изолируют сварочную дугу и металл сварочной ванны от вредного воздействия окружающей среды. Используются инертные (Ar, He) и активные (CO_2, N_2, H_2) газы, а также их смеси.

Инертные газы применяют для сварки химически активных металлов (титан, алюминий, магний и др.), а также во всех случаях, когда необходимо получать сварные швы, однородные по химическому составу с основным и присадочным металлом (например, при сварке высоколегированных сталей). Инертные газы обеспечивают защиту дуги и свариваемого металла, не оказывая на него металлургического воздействия. Активные защитные газы, в отличие от инертных, вступают в химическое взаимодействие со свариваемым металлом, растворяются в нем и оказывают на него металлургическое воздействие. Основным активным газом, используемым для защиты зоны сварки, является углекислый газ (CO_2). Смеси газов в ряде случаев обладают лучшими технологическими свойствами, чем отдельные газы. Например, смесь углекислого газа с кислородом (2...5%) способствует мелкокапельному переносу металла, уменьшению разбрызгивания (на 30...40%), улучшению формирования шва. Применение смеси из 70% He и 30% Ar позволяет увеличивать производительность при сварке алюминия, улучшает формирование шва и позволяет сваривать за один рабочий ход металл большей толщины.

На рис.2.44 представлена схема дуговой сварки в среде защитных газов.

Электрическая дуга *1* возбуждается между вольфрамовым электродом *2* и свариваемым изделием *3* и защищается от окружающей атмосферы струей газа (как правило, аргона) *4*, подаваемого через сопло *5* сварочной горелки (рис.2.44,а) Вольфрамовый электрод находится внутри сопла горелки, что обеспечивает его охлаждение струей защитного газа и повышение стойкости против термического разрушения. Формирование металла шва может происходить как за счет оплавления кромок соединяемых деталей, так и за счет дополнительного введения в зону сварочной дуги присадочной проволоки. Защитный газ начинают подавать за 10...15 с до начала сварки. Электрическая дуга возбуждается кратковременным разрядом тока высокой частоты и напряжения с помощью осцилля-

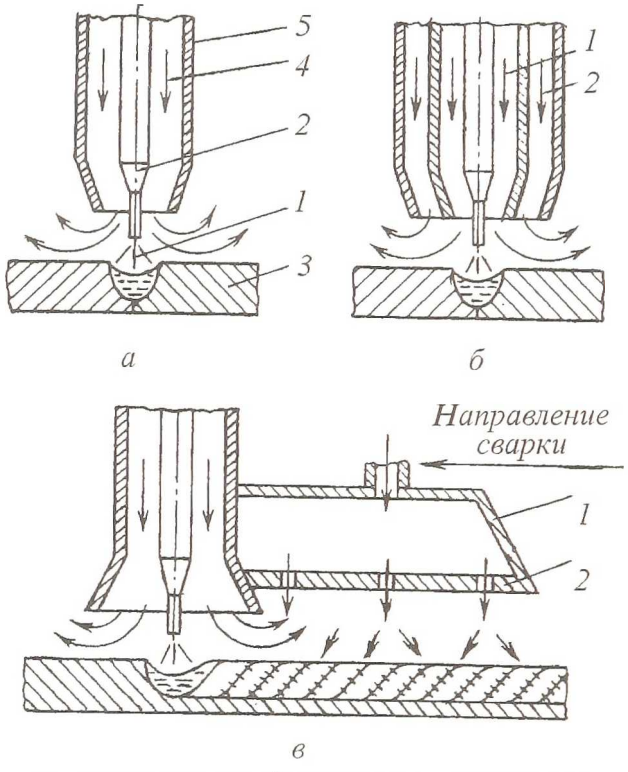


Рис.2.44. Схема дуговой сварки в среде защитных газов

тора. По окончании сварки дугу обрывают постепенно для заварки кратера. Для защиты охлаждающегося металла подачу газа прекращают через 10...15 с после выключения сварочного тока.

В ряде случаев с целью экономии инертных газов, а также повышения технологических свойств защитной среды применяют горелки, конструкция которых обеспечивает комбинированную защиту двумя концентрическими потоками газов (рис.2.44, б). Например, внутренний поток *1* образуется аргоном, а внешний *2* углекислым газом. При сварке высокоактивных металлов (Ti, Zr, Ta, W, Mo, Nb) необходимо защищать не только расплавленный металл, но и зону металла, нагреваемую при сварке до температуры более 300°С. Для этого применяют дополнительные насадки *1* (рис.2.44, в) с распределительными сетками *2* для выхода защитного газа по длине шва. Наиболее эффективная защита металла шва и зоны термического влияния обеспечивается при сварке в камерах с контролируемой атмосферой. Камеры предварительно вакуумируются, а затем заполняются защитным газом (как правило, инертным) под небольшим давлением.

Аргонодуговая сварка это процесс дуговой сварки, при котором в качестве защитного газа используется аргон. Применяют

аргонодуговую сварку неплавящимся вольфрамовым или плавящимся электродами. В качестве плавящихся электродов, как правило, используют сварочные проволоки, по химическому составу соответствующие свариваемым материалам и лишь в некоторых случаях с несколько повышенным содержанием кремния и марганца.

Неплавящиеся электроды служат для возбуждения и поддержания горения сварочной дуги. В основном используют вольфрамовые (диаметром от 0,2 до 12 мм), реже угольные и гарфитовые электроды (при сварке в активных газах). Для повышения устойчивости горения дуги, стойкости электрода и его эмиссионной способности в состав вольфрамового электрода вводят обычно 1,5...3% окислов активирующих редкоземельных металлов (тория, лантана, иттрия).

Аргонодуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом может быть ручной и автоматической, с подачей и без подачи присадочной проволоки. Процесс применяется главным образом для металлов толщиной не более 5 мм. Большинство материалов свариваются на постоянном токе прямой полярности, а сварку алюминия, магния, бериллия и ряда высоколегированых сталей на переменном токе.

При сварке на прямой полярности (минус на электроде) создаются лучшие условия для термоэлектронной эмиссии, обеспечивается достаточно высокая стойкость вольфрамового электрода и используются большие сварочные токи. Сварочная дуга при прямой полярности легко возбуждается и горит устойчиво при напряжении 10...15 В в широком диапазоне сварочных токов.

При обратной полярности (минус на изделии) возрастает напряжение на дуге, уменьшается устойчивость её горения, резко уменьшается стойкость вольфрамового электрода против термической эррозии, повышается температура его нагрева и расход. Однако сварочная дуга при обратной полярности обладает важными и положительными технологическими свойствами. При её воздействии на свариваемый металл с его поверхности легко удаляются окислы и загрязнения. Это объясняется тем, что при обратной полярности поверхность свариваемого металла бомбардируется тяжелыми положительно заряженными ионами аргона, которые, перемещаясь под действием электрического поля от плюса (электрод) к минусу (изделие), разрушают окисные пленки на поверхности свариваемого металла, а выходящие с катода (поверхности изделия) электроны способствуют удалению разрушенных окисных пленок. Этот процесс разрушения и удаления окисной пленки с поверхности свариваемого металла называется катодным распылением. Данное свойство сварочной дуги обратной полярности используют при сварке Al, Be, Mg и их сплавов, на поверхности которых всегда присутствуют химически активные и механически прочные окисные пленки.

Следует отметить, что при сварке на постоянном токе обратной полярности стойкость вольфрамового электрода против термической эррозии и разрушения недостаточна, поэтому сварку Al, Be, Mg и их сплавов чаще ведут на переменном токе. При этом разрушение и удаление окисной пленки, т.е. процесс катодного распыления, происходит в те полупериоды, когда свариваемое изделие является катодом. Таким образом, при сварке неплавящимся электродом на переменном токе в определенной степени реализуются преимущества дуги прямой и обратной полярности, т.е. обеспечивается и стойкость вольфрамового электрода и разрушение окисных пленок.

Аргонодуговая сварка плавящимся электродом применяется для сварки цветных металлов (Al, Mg, Cu, Ti и их сплавов) и легированных сталей. Этот вид сварки является механизированым, её выполняют на автоматах и полуавтоматах. Сварка в защитных газах плавящимся электродом осуществляется, как правило, на постоянном токе обратной полярности, что позволяет максимально использовать теплоту сварочной дуги и увеличить глубину проплавления на единицу сварочного тока. Стабильность параметров сварного шва обеспечивается постоянством длины дуги, которая поддерживается процессом саморегулирования.

К основным параметрам режима сварки плавящимся электродом относятся: сила тока, его полярность, напряжение дуги, диаметр и скорость подачи электродной проволоки, состав и расход защитного газа, скорость сварки. Сварочный ток, сила которого определяет размеры шва и производительность процесса, зависит от диаметра проволоки и устанавливается в соответствии со скоростью её подачи.

Механизированную сварку выполняют обычно на меньшей силе тока, чем автоматическую. Сварку плавящимся электродом можно выполнять в различных пространственных положениях, используя проволоку диаметром до 2 мм. Сварка швов, расположенных в нижнем положении, выполняется проволокой диаметром 1,2...3,0 мм.

Образование сварного соединения с заданными свойствами и размерами может быть обеспечено как стационарной, так и импульсной дугой. При сварке стационарной дугой плавление электрода, проплавление основного металла и перенос капель металла определяются установившимися значениями напряжения и тока.

Вместе с тем кратковременное изменение длины дуги, напряжения и тока при переносе капель могут существенно повлиять на разбрызгивание металла и формирование шва.

Для улучшения технологических характеристик и расширения области применения автоматических способов сварки необходимо изменить характер течения процессов и перенос электродного металла. Сделать это можно многими методами, в частности, изменяя

напряжение и ток по определенной программе. Процессы, в которых перенос электродного металла и другие характеристики задаются определенной программой изменения напряжения, тока и длины дуги, называют импульсно-дуговыми. Сварку с непрерывным горением дуги обычно ведут с наложением импульсов тока одинаковых параметров или группы импульсов различных параметров.

Главными факторами, определяющими поведение жидкого металла на торце электрода, являются силы поверхностного натяжения $F_{ПН}$, удерживающие каплю на торце, и продольная составляющая электродинамической силы $F_{ЭД}$, стремящейся оторвать каплю. Следовательно, условием отрыва и переноса капли вдоль оси электрода по направлению от торца электрода к сварочной ванне является неравенство $F_{ЭД} > F_{ПН}$.

Обе эти силы зависят от силы сварочного тока. С увеличением сварочного тока электродинамическая сила увеличивается, а сила поверхностного натяжения падает из-за роста температуры жидкого металла капли. Электродинамическая сила пропорциональна квадрату сварочного тока и радиусу столба дуги и обратно пропорциональна радиусу электрода. Её направление не зависит от направления тока и определяется отношением радиуса столба дуги к радиусу электрода. Электродинамическая сила всегда направлена от меньшего сечения зоны переменного сечения проводника к большему. Для устойчивого переноса капли в любом пространственном положении электродинамическая сила должна превышать силу поверхностного натяжения в 1,5...2,0 раза.

Отличительной особенностью сварки в углекислом газе плавящимся электродом является необходимость применения электродных проволок с повышенным содержанием элементов-раскислителей (кремния и марганца), компенсирующих их выгорание в зоне сварки и предотвращающих дополнительное окисление металла шва и образование в нем пор. Для углеродных сталей в основном используют сварочные проволоки марок Св-10ГС, Св-08Г2С. Причины возможного окисления и образования пор при сварке в углекислом газе следующие. Под действием теплоты сварочной дуги углекислый газ диссоциирует с образованием атомарного кислорода по реакции:

$CO_2 \leftrightarrow CO+O$; $CO \leftrightarrow C+O$

Атомарный кислород окисляет железо и легирующие элементы, содержащиеся в стали

$Fe(Me)+O \rightarrow FeO\ (Me_mO_n)$.

В результате этого металл сварочной ванны насыщается кислородом, а его свойства ухудшаются. При охлаждении расплавленного металла углерод, содержащийся в стали, окисляясь, способствует образованию окиси углерода по реакциям:

$C+O \rightarrow CO$; $FeO+C \rightarrow Fe+CO$.

Образующийся при кристаллизации металла шва углекислый газ выделяется в виде пузырьков, часть из которых, не успевая покинуть металл сварочной ванны, остается в металле шва, образуя поры.

В том случае, если сварочная проволока легирована кремнием и марганцем, то окислы железа раскисляются не за счет углерода, а в основном за счет этих элементов, в результате чего предотвращается образование окиси углерода и образование пор. Разложение окислов железа идет по реакциям:

$$[FeO]+[Si; Mn] \rightarrow [Fe]+[SiO_2; MnO] .$$

Окислы SiO_2 и MnO в виде шлака скапливаются на поверхности сварочной ванны, а после её кристаллизации на поверхности металла шва.

Сварка в углекислом газе характеризуется высокой производительностью и низкой стоимостью. К недостаткам её относятся: повышенное разбрызгивание расплавленного металла и не всегда удовлетворительный внешний вид сварного шва.

Основные преимущества сварки в защитных газах:

- высокая производительность (примерно в 1,5...2 раза выше, чем при автоматической дуговой сварке под флюсом) за счет использования большой плотности тока на единицу поперечного сечения электродной проволоки и отсутствия необходимости зачистки поверхности шва от шлака;
- высокое качество шва за счет надежной защиты зоны сварки от взаимодействия с окружающей средой;
- возможность сварки в различных пространственных положениях, получение соединений практически любой формы и конфигурации;
- узкая зона термического влияния и относительно небольшие деформации изделий ввиду высокой концентрации теплоты сварочной дуги;
- возможность сварки металлов различной толщины (от долей миллиметра до десятков миллиметров);
- широкие возможности по механизации и автоматизации процесса сварки;
- возможность наблюдения и корректирования процесса сварки.

Недостатками сварки в защитных газах является открытая дуга, что повышает возможность поражения оператора-сварщика световым излучением, и необходимость защиты зоны сварки от сквозняков (при местной защите), что осложняет применение этого способа сварки в монтажных условиях на открытом воздухе.

Кроме электродуговых способов сварки в производстве ЛА нашли применение лучевые способы сварки, в том числе электронно-лучевая сварка.

При **электронно-лучевой сварке** нагрев материала до расплавления осуществляют бомбардировкой его пучком электронов,

летящих с большой скоростью в вакууме. Сварное соединение в виде шва образуется в процессе кристаллизации расплавленного металла, находящегося в сварочной ванне.

В установках для сварки свободные электроны концентрируют в пучок и сообщают им большую скорость с целью увеличения их кинетической энергии, которая затем переходит в тепловую энергию при резком торможении в материале. Существуют различные схемы для получения свободных электронов - электронных пушек. Свободные электроны получают, применяя термоэлектронные катоды из гексаборида лантана LaB_6, обладающего высокими эмиссионными свойствами.

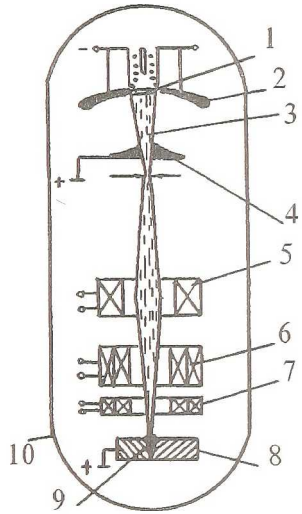


Рис.2.45. Схема электронно-лучевой сварки:
1 - катод; 2 - прикатодный электрод; 3 - электронный луч; 4 - ускоряющий анод; 5 - фокусирующая электромагнитная линза; 6, 7 - электромагнитная система отклонения луча; 8 свариваемые детали; 9 сварной шов; 10 вакуумная камера

На рис.2.45 представлена схема электронно-лучевой сварки. Ускорение и концентрацию электронов осуществляют электрическими и магнитными полями с помощью электромагнитных линз.

Электронно-лучевая установка состоит из следующих основных устройств: электронная пушка; высоковольтный источник тока, обеспечивающий получение ускоряющего напряжения до 200 кВ и более; вакуумная камера, где размещаются свариваемые детали; вакуумные насосы, создающие разряжение порядка $6 \cdot 10^{-3}$ Па; контрольно-распределительная вакуумная аппаратура. В настоящее время наблюдается тенденция в развитии оборудования для электронно-лучевой сварки крупногабаритных изделий. Это проявляется в создании больших вакуумных камер, герметизации и создании вакуума на отдельных участках свариваемых изделий.

Основными параметрами электронно-лучевой сварки являются: ускоряющее напряжение, ток электронного луча, скорость сварки, размеры фокального пятна, частота и амплитуда поперечных колебаний луча.

К важному достоинству электронно-лучевой сварки относится возможность получения швов с глубоким проплавлением, так называемых "кинжальных" и сваривать за один рабочий ход детали толщиной до 100 мм (рис.2.46).

Этот метод сварки применяется в машиностроении в производстве конструкций из нержавеющих и высокопрочных ста-

Рис.2.46. Схема поперечных сечений швов для различных методов сварки:
а ручная дуговая; б автоматическая под слоем флюса; в - электронно-лучевая

лей, сплавов на основе алюминия и титана, а также некоторых видов керамики с металлами, тугоплавких металлов и др.

Электронно-лучевая сварка имеет следующие преимущества: высокое качество соединений, так как сварка ведется в вакууме; малая зона термического влияния и небольшие сварочные деформации; глубокое проплавление металлов; затраты энергии составляют 15...20% от затрат энергии при сварке под флюсом.

2.6. Конструктивно-технологические характеристики сварных соединений

Сварным соединением называется неразъемное соединение, выполненное с помощью сварки. Сварные соединения могут быть стыковыми, угловыми, тавровыми и нахлесточными. Стыковое соединение это сварное соединение двух элементов, расположенных на одной поверхности или в одной плоскости (рис.2.47, а). Угловое соединение это сварное соединение двух элементов, расположенных под прямым углом и сваренных в месте примыкания их краев (рис.2.47, б). Тавровое соединение - это сварное соединение, в котором к боковой поверхности одного элемента примыкается под прямым углом и приварен торцом другой элемент (рис.2.47, в). Нахлесточное соединение это соединение, в котором свариваемые элементы расположены параллельно и частично перекрывают друг друга (рис.2.47, г).

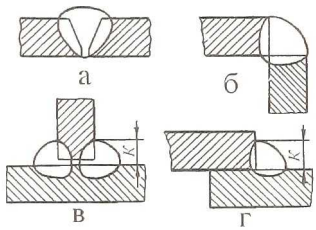


Рис.2.47. Виды сварных соединений

Сварной шов это участок сварного соединения, образовавшийся в результате кристаллизации расплавленного металла сварочной ванны. Сварочная ванна это часть сварного шва, находящаяся при сварке в жидком состоянии. Металл подвергающихся сварке деталей называется основным металлом. Металл, предназначенный для введения в сварочную ванну в дополнение к расплавленному основному, называется присадочным металлом. Сплав, образованный переплавленным основным и наплавленным металлами или только переплавленным основным металлом, называется металлом шва.

При соединении деталей большой толщины перед сваркой производится механическая обработка их кромок с соблюдением требований ГОСТа на конструктивные элементы. К конструктивным элементам, подготовленных и собранных под сварку деталей стыкового соединения относятся (рис.2.48, а): притупление кромок (с), за-

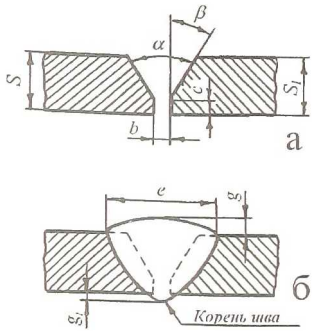


Рис.2.48. Стыковое сварное соединение

зор (*b*) и угол скоса кромок (β). Кромками называются торцевые поверхности деталей, подвергающиеся нагреву и плавлению при сварке. Придание кромкам необходимой формы называется разделкой кромок, а угол между скошенными кромками - углом α разделки кромок.

К конструктивным элементам сварного шва стыкового соединения (рис.2.48, б) относятся: ширина шва (e), усиление шва (g), усиление корня шва (g_1). Усиление шва часть металла шва, возвышающаяся над поверхностью свариваемых деталей. Часть сварного шва, наиболее удаленная от его лицевой поверхности, называется корнем шва. К конструктивным элементам угловых швов в тавровых и нахлесточных соединениях относится катет шва K (см.рис.2.47, в, г). Сваривать можно элементы с одинаковыми и с разными толщинами (*S* и S_1) (рис.2.48, а).

В зависимости от положения в пространстве (рис.2.49) швы подразделяют на нижние (а), горизонтальные (б), вертикальные (в) и потолочные (г) (верхние).

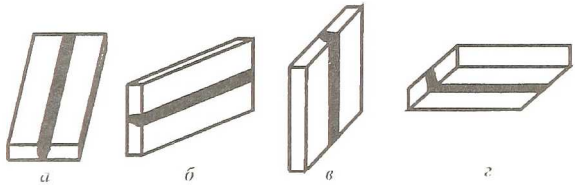


Рис.2.49. Положение шва в пространстве

По протяженности различают непрерывные и прерывистые швы. Непрерывный шов это сварной шов без промежутков по его длине, прерывистый с промежутками по длине. Прерывистые швы, например, тавровых соединений подразделяют на цепные и шахматные. Цепной прерывистый шов это двусторонний прерывистый шов, у которого промежутки расположены по обеим сторонам стенки один против другого. Шахматный прерывистый шов это двусторонний прерывистый шов, у которого промежутки на одной стороне стенки расположены против сваренных участков шва с другой стороны.

По числу слоев сварные швы могут быть однослойными и многослойными. Слой это часть металла сварного шва, которая состоит из одного или нескольких валиков, располагающихся на одном уровне поперечного сечения шва. Валик это металл, наплавленный или переплавленный за один рабочий ход.

Условные изображения или обозначения швов сварных соединений регламентированы ГОСТ 2.312-72, согласно которому видимые швы независимо от способа сварки условно изображают на чертежах сплошными основными линиями, а невидимые швы штриховыми линиями (рис.2.50).

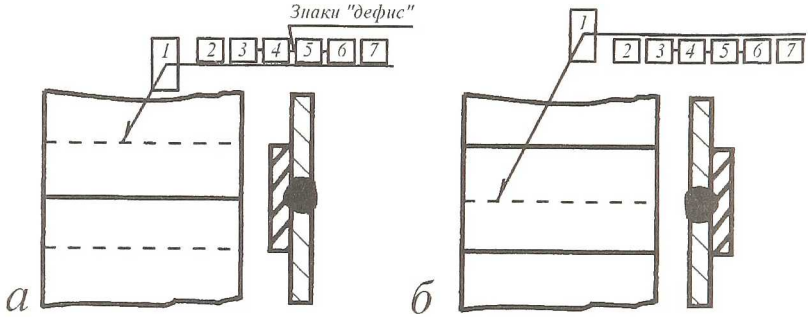


Рис.2.50. Условное изображение шва стыкового соединения:
а - видимый шов; б - невидимый шов; 1-7 - элементы, входящие в состав условного обозначения шва

Условные обозначения стандартного шва включают в себя следующие элементы.

1. Вспомогательные знаки:

- шов выполняется при монтаже изделия,

шов выполняется по замкнутой линии.

2. ГОСТ на конструктивные элементы сварного соединения в зависимости от толщины свариваемого материала и способа сварки:
ГОСТ 5264-80 - для ручной дуговой сварки,
ГОСТ 14771-76 - для дуговой сварки в защитных газах и т.д.

3. Буквенно-цифровое обозначение шва в зависимости от толщины соединяемых деталей и способа сварки, например: С2 - стыковое соединение; Т3 - тавровое соединение; Н1 нахлесточное соединение; У2 - угловое соединение.

4. Условное обозначение способа сварки: Р - ручная электродуговая; Г газовая; А автоматическая сварка под флюсом без применения подкладок, подварочного шва и т.д.; П - полуавтоматическая сварка под флюсом; $А_З$ автоматическая сварка в защитных газах; $Э_Л$ электронно-лучевая сварка; $Л_З$ - лазерная сварка; $У_З$ - ультразвуковая сварка и т.д..

5. Знак и размер катета шва в мм.

6. Знак протяженности шва: / шов прерывистый с цепным расположением свариваемых участков, Z-шов прерывистый с шахматным расположением свариваемых участков, шов по незамкнутой линии.

7. Вспомогательные знаки: ⌓ усиление шва снять, ⌒ - наплавы и неровности шва обработать с плавным переходом к основному металлу, R_z30 - параметр шероховатости обработанной поверхности (30 мкм).

Примеры условных обозначений швов сварных соединений на чертежах приведены на рис.2.51.

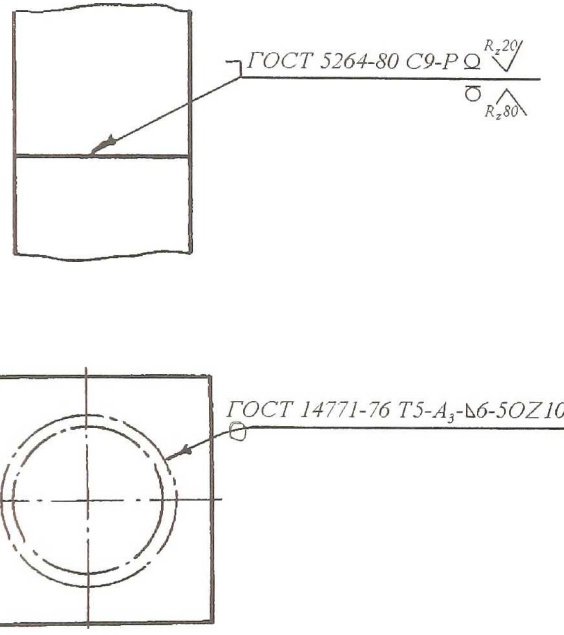


Рис.2.51. Примеры условного обозначения шва на чертеже:
а - шов стыкового соединения с криволинейным скосом одной кромки, двусторонний, выполненный ручной электродуговой сваркой при монтаже изделия, усиление снято с обеих сторон; параметры шероховатости шва: с лицевой стороны R_z= 20 мкм, с обратной стороны R_z= 80 мкм; б шов таврового соединения без скоса кромок, двусторонний, прерывистый, с шахматным расположением участков шва, выполненный автоматической дуговой сваркой в защитных газах с катетом шва 6 мм по замкнутой линии

Работоспособность, надежность и долговечность сварных конструкций, их технологичность при изготовлении и монтаже, а также другие технические характеристики определяются, в основном, конструктивными и технологическими решениями, которые принимаются при проектировании конструкции и технологии её изготовления.

Выбор оптимального комплекта конструктивных и технологических решений представляет сложную задачу. Из многих возможных вариантов необходимо выбрать один, обеспечивающий получение от конструкции требуемых качеств при минимальных

затратах труда, материалов и других средств производства. Правильный выбор комплекта решений может быть выполнен проектировщиками лишь при всестороннем учете всех специфических особенностей, вносимых в работу конструкции сваркой.

При разработке технологии сварки конкретной конструкции необходимо учитывать как свойства материала, так и те изменения, которые могут наблюдаться при сварке в материале сварного соединения. В свою очередь, эти изменения определяются технологическими параметрами выбранного способа сварки (концентрацией источника нагрева, скоростью сварки и др,); составом и температурой окружающей среды; составом используемых при сварке дополнительных материалов флюсов, присадочной проволоки, газов защитных и инертных; характером подготовки деталей под сварку (разделкой кромок, подготовкой поверхности и др.); конструкцией изделия (его жесткостью, наличием остаточных напряжений, концентраторов и т.д.); пространственным положением осуществляемого процесса сварки.

Технологичность узла может быть оценена по следующим показателям:

- свариваемости материалов, из которых изготавливаются соединяемые детали;
- конфигурации, числу, расположению и протяженности сварных швов;
- конструктивному оформлению свариваемых элементов в соответствии с требованиями нормалей и стандартов (соотношение толщин соединяемых деталей, расстояния от края детали при контактной точечной и шовной сварке и т.п.);
- возможности подхода в зону сварки сварочных головок, электродов;
- возможности подхода для сборки и демонтажа съемной сварочной оснастки;
- возможности визуального осмотра и контроля сварных соединений;
- обоснованности технических требований чертежа допускам по основным размерам, контролируемым после сварки, технологическим припускам на обработку и т.п.;
- необходимости и возможности обработки после сварки (механической и термической обработки);
- возможности применения механизированных и автоматизированных процессов, стандартного оборудования (автоматов, машин для контактной сварки, сварочных манипуляторов и стендов) без изготовления дополнительной сложной и трудоемкой специальной оснастки.

При выборе того или иного способа сварки для получения качественной сварной конструкции необходимо учитывать очень важное понятие - свариваемость материалов.

Свариваемость технологическое свойство материалов (металлов) или их сочетаний образовывать в процессе сварки соединения, отвечающие конструктивным и эксплуатационным требованиям к ним. Как правило, конструктивные и эксплуатационные требования, предъявляемые к сварным соединениям, определяются свойствами используемых материалов, поэтому часто под свариваемостью понимают способность материалов образовывать в процессе сварки соединения, не уступающие по своим свойствам свариваемым материалам. В общем случае свариваемость материала есть комплексное свойство и оно тем выше, чем проще технология сварки, чем больше число способов сварки может быть использовано для соединения материала, чем шире область параметров режимов, обеспечивающих заданные требования к свойствам соединения, чем шире номенклатура изделий, для которых могут быть использованы сварные соединения из данного материала. Как и всякое комплексное свойство, свариваемость определяется составом и физическими свойствами материала.

К факторам, наиболее сильно влияющим на свариваемость, следует отнести:

- химический состав материала, который определяет его температурный интервал кристаллизации, фазовый состав, фазовые и структурные превращения на этапе нагрева и охлаждения;
- теплофизические свойства, которые определяют область и степень завершенности процессов превращения, проходящих в материалах под воздействием сварочного цикла;
- механические свойства, которые определяют способность материала воспринимать механические воздействия (напряжения), возникающие за счет неравномерности и охлаждения, жесткости конструкций и других факторов, без разрушения;
- специальные физико-химические свойства, которые определяют активность физико-химических реакций, протекающих в сварочной ванне и зоне термического влияния.

В общем плане несвариваемых материалов нет, однако чем хуже свариваемость материала, тем сложнее технология сварки, тем больше мероприятий необходимо применять для получения качественного сварного соединения.

Оценивая конструкцию с точки зрения расположения, конфигурации, числа сварных швов, конструктивного оформления свариваемых элементов, можно отметить следующее. Конструкция должна содержать минимальное число сварных швов, протяженность их должна быть минимально возможной, пересечения сварных швов

должны отсутствовать или число их должно быть незначительным. Увеличение числа сварных швов и их протяженности, наличие пересечения швов может приводить к значительным концентрациям напряжений, снижению прочности, деформациям узла.

Наиболее технологичными по конфигурации являются прямолинейные и кольцевые (меридиональные) швы, расположенные на плоских поверхностях и телах вращения цилиндрах, конусах, сферах. Наличие таких швов позволяет применять стандартное, серийно выпускаемое сварочное оборудование сварочные автоматы, манипуляторы, стенды, более простую унифицированную сварочную оснастку, позволяет механизировать и автоматизировать процесс сварки узлов в условиях даже мелкосерийного производства. Наличие швов сложной конфигурации, расположенных на плоских поверхностях или телах вращения, на поверхностях сложной кривизны, требует в ряде случаев применения специальной сварочной оснастки. Механизация и автоматизация процесса сварки таких швов представляет определенные трудности, и в условиях мелкосерийного производства сварка швов сложной конфигурации чаще всего ведется вручную. Вместе с тем высокие требования к качеству сварных узлов ЛА обязывают изыскивать пути механизации процесса сварки криволинейных швов. В некоторых случаях эта задача может быть решена за счет разработки приспособлений, в которых используются копиры и программные устройства.

Расположение сварных швов должно быть таким, чтобы обеспечивался свободный доступ к ним сварочных головок, электродов и инструмента, свободный доступ для сборки и монтажа съемной сварочной оснастки, осмотра и контроля, устранения дефектов, механической обработки, если она необходима. При сварке профильных деталей с листовыми желательно, чтобы профили были открытыми: угольник с нулевой или открытой малкой, тавр ⊥, z-образный. Наличие П-образных профилей (при сварке по одной из полок), профилей другого сечения с закрытой малкой затрудняет подходы при сварке и контроле.

Нетехнологичным является расположение шва, близкое к выступающим частям детали (например, буртам), так как это затрудняет процесс сварки и увеличивает концентрацию напряжений. Расположение шва против бурта существенно ухудшает условия проведения рентгеновского контроля. Малое расстояние между соседними швами приводит также к ухудшению структуры металла и увеличению концентрации напряжений.

Большое значение на качество сварки оказывает соотношение толщин соединяемых элементов деталей и количество свариваемых одновременно деталей. При сварке плавлением не рекомендуется соединение трех и более деталей одним швом, желательно, чтобы толщина соединяемых элементов была одинаковой или отличалась

незначительно. Толщина свариваемых деталей влияет на выбор вида сварки. Соотношение толщин и число деталей в соединении при контактной точечной и шовной сварке зависят от категории соединения и регламентируются производственными инструкциями и техническими условиями.

Конструктивное оформление сварных швов должно соответствовать нормалям и стандартам.

При сварке плавлением наиболее технологичны стыковые соединения: они имеют высокую прочность как при статических, так и при знакопеременных нагрузках, чем и объясняется широкое применение их в конструкциях. Соединения в тавр обладают значительно меньшей прочностью, особенно при знакопеременных нагрузках. Соединения внахлестку просты в изготовлении и достаточно технологичны. Однако прочность этих соединений, особенно усталостная невелика. Эти соединения применяются редко, только тогда, когда невозможно другое конструктивное решение.

Кроме указанных выше показателей, технологичность сварных узлов может оцениваться и по общим критериям, используемым для оценки технологичности клепаных конструкций, таким, как членение узла (агрегата) на отдельные подсборки, коэффициент использования нормализованных и стандартизованных заготовок (листов, профилей, труб) для изготовления деталей и др.

В случае изменения конструкции узла в целях повышения его технологичности необходимо рассчитать некоторые количественные показатели технологичности, такие, например, как уменьшение протяженности сварных швов (абсолютное или на единицу веса конструкции), повышение степени механизации процесса (отношение длины швов, выполненных механизированным способом, к общей протяженности сварных швов) и др. Окончательной оценкой эффективности предлагаемого конструктивного изменения является снижение технологической себестоимости узла.

Важнейшими особенностями сварных конструкций, которые совместно с общими принципами должны учитываться при проектировании, являются следующие.

1. Монолитность сварных соединений, наступающая при их выполнении и вызывающая совместное деформирование соединяемых элементов и всей конструкции в целом при сварке и последующем остывании.
2. Изменение размеров и формы соединяемых элементов, а также всей конструкции в целом в результате накопления в областях значительного разогрева при сварке местных пластических деформаций и местных и общих упругих деформаций всей конструкции.
3. Накопление в отдельных областях, элементах, узлах и во всей конструкции остаточных сварочных напряжений, пиковые

значения которых достигают предела текучести металла конструкции.

4. Изменение напряженного и деформированного состояния элементов, узлов и всей конструкции вследствие выполнения после сварки технологических процессов, связанных с термическим или механическим воздействием на конструкцию, а также в результате воздействия на конструкцию в эксплуатации силовых и термических нагрузок.
5. Снижение пластичности в отдельных зонах металла конструкции, особенно в районах расположения концентраторов, претерпевающих большие пластические деформации в процессе сварки.

Учет перечисленных особенностей сварной конструкции при проектировании их требует определения напряженного состояния и ожидаемых сварочных деформаций, соответствующих рассматриваемому варианту конструкции и технологических решений. Определение сварочных деформаций и напряжений необходимо также для анализа их влияния на процесс изготовления конструкций и их поведения в эксплуатации.

Процесс формирования сварного соединения происходит в условиях неравномерного нагрева, приводящего к развитию деформаций, которые называются временными, изменяющими форму и размеры сварного соединения в процессе сварки. Временные деформации предопределяют характер и значение остаточных деформаций, выражающихся в послесварочных изменениях размеров сварной конструкции. В зависимости от типа сварного соединения, его геометрических размеров и сочетания свариваемых элементов все многообразие изменения формы сварной конструкции можно разделить на несколько вариантов.

Деформации продольного укорочения. Они проявляются в изменении первоначальных размеров свариваемых элементов в направлении, параллельном продольной оси сварного шва.

Деформации поперечного укорочения. В этом случае происходит изменение первоначальных размеров свариваемых элементов в направлении, перпендикулярном к продольной оси сварного шва.

Угловые деформации. Эти деформации проявляются при повороте свариваемых листов на некоторый угол относительно исходного положения. Эти деформации вызываются напряжениями сжатия, возникающими в конструкции преимущественно из-за остаточных пластических продольных деформаций укорочения.

В случае изготовления конструкций сложной геометрической формы, насыщенной сварными швами, изменения проектных размеров и форм конструкции вызываются не одним из перечисленных видов деформаций, а их совокупностью, однако они могут быть дифференцированы на отдельные виды.

Процесс образования напряжений и деформаций рассмотрим в условиях соблюдения гипотезы плоских сечений для полных продольных деформаций и допущений об одновременности сварки шва по всей длине и линейности возникающего напряженного состояния, ориентированного вдоль соединения [33]. На стадии нагрева в средней высоконагретой области соединения в продольном направлении протекают пластические деформации сжатия (укорочения) и формируется так называемая зона пластических деформаций, ширина которой для такого симметричного соединения обычно обозначается $2b_n$. В относительных единицах разница между поясной и температурной деформациями показана на рис.2.52, а. Здесь же обозначена линией $\varepsilon_{вп}$ (внутренняя деформация), прямой штриховкой отмечены уравновешенные по сечению упругие деформации $\varepsilon_{упр}$ и косой пластические деформации сжатия (укорочения). Таким образом, можно говорить об эпюре максимальных пластических деформаций укорочения $\varepsilon_{п.д.ук}$, которая на рисунке показана отдельно.

На стадии охлаждения в средней части соединения протекают продольные пластические деформации удлинения, которые в значительной мере компенсируют пластическое сжатие, возникшее на стадии нагрева. Тем не менее, компенсация происходит лишь частично. В конечном итоге в средней части соединения (пластической зоне) остаются пластические деформации укорочения определенного значения. Деформации пластического удлинения при охлаждении показаны на рис.2.52, б косой штриховкой. Упругие остаточные деформации уравновешены по поперечному сечению и отмечены прямой штриховкой. Эпюры пластических деформаций удлинения $\varepsilon_{пл.уд}$ и остаточных пластических деформаций укорочения показаны на том же рисунке отдельно. Именно остаточные пластические деформации укорочения в поперечном сечении и неравномерный характер их распределения по сечению являются причиной образования в сварочном соединении остаточных напряжений.

Для обеспечения размерной стабильности, наряду с минимумом остаточных деформаций, нужно уже на стадии проектирования строго регламентировать очередность наложения сварных швов, поскольку переменная технологическая жесткость при соединении элементов конструкций соизмеримых размеров может существенно влиять на напряженно-деформированное состояние сварного соединения и конструкции в целом, а следовательно и на размерную стабильность.

На рис.2.53 приведена схема трех вариантов сборки и сварки двутавра (сборка на прихватках опущена, так как последние несущественно изменяют жесткость).

При сборке и сварке узла по варианту I за счет меньшей жесткости в поясных швах тавров сжимающие напряжения будут вы-

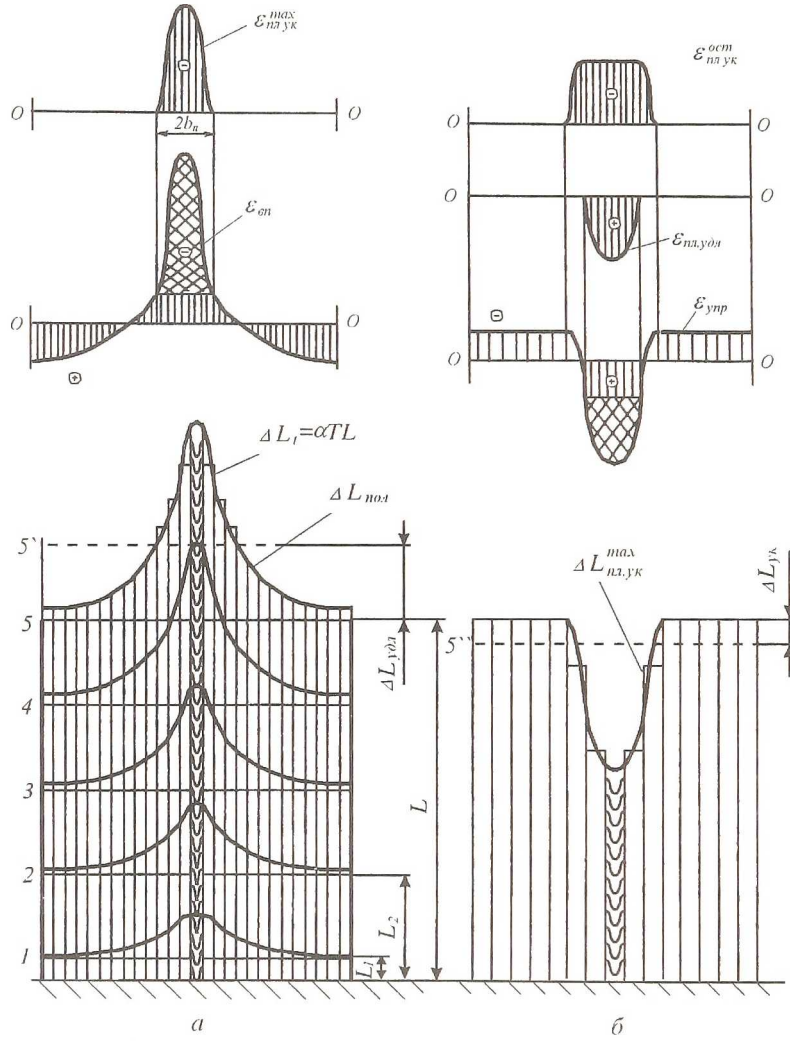


Рис.2.52. Механизм образования деформаций при сварке

ше, чем в варианте III. При сборке и сварке узла по варианту II сжимающие напряжения в первоначальном свариваемом тавре будут выше, чем в последующем. При варианте III напряжения сжатия в обоих поясных швах тавров минимальны и близки по значению. Таким образом, наихудшим является вариант II, поскольку из-за разнонапряженности зон закалки поясных сварных швов для него характерно максимальное деформирование во времени.

Из вариантов I и III сложно выбрать наилучший, поскольку в первом из них наиболее высокий уровень снижающих напряжений

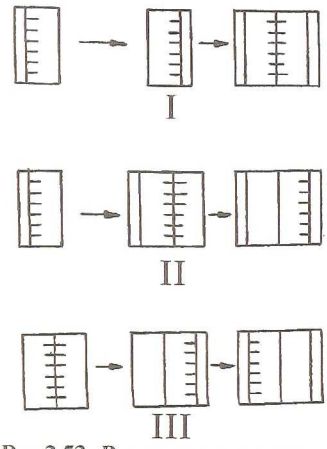


Рис.2.53. Варианты последовательности сборки и сварки составного двутавра

в стыковом сварном соединении в существенной мере компенсируется равнонапряженностью сварных швов узлов, в то время как для варианта III, отличающегося некоторой асимметрией полей напряжений (снижающейся по мере увеличения h), характерен меньший уровень последних.

Для многих видов конструкций предварительная оценка степени сварочных деформаций не позволяет их предотвратить с помощью досварочных конструктивно-технологических мероприятий. Такие конструкции требуют послесварочной правки, и разработка механизированных методов восстановления их проектных форм и размеров имеет в этих случаях большое практическое значение.

При разработке технологического процесса сборки-сварки прецизионных конструкций наряду с безусловным обеспечением выполнения требований проектно-конструкторской технологической документации необходимо предусматривать дополнительные мероприятия, направленные на повышение размерной стабильности. К таким чисто технологическим предупредительным мероприятиям могут быть отнесены следующие.

1. Предварительный подогрев сварного соединения или всей конструкции с целью уменьшения температурных градиентов и, как следствие, временных температурных напряжений и скоростей охлаждения при сварке, а значит, достижения после полного охлаждения меньшего уровня остаточных напряжений и более стабильной структуры.
2. Сопутствующий подогрев сварного соединения или конструкции (элемента), если предварительный подогрев недостаточно эффективен.
3. Четкая оптимизация параметров режимов сварочного процесса.
4. Правильный выбор типа предварительной разделки кромок для уменьшения поперечной усадки сварного соединения.
5. Искусственное создание перед сваркой в зоне будущего соединения полей напряжений путем упругого или упруго-пластического предварительного деформирования соединения, отдельных элементов или всей конструкции в целом.
6. Использование в случае целесообразности жестких зажимных сборочно-сварочных приспособлений.

Основными несущими и емкостными элементами изделий ЛА являются тонкостенные оболочки (рис.2.54). Чаще всего применяют сферические, цилиндрические, конусные, тороидальные оболочки.

Основной вид сварного соединения в оболочках стыковой, выполняемый, как правило, дуговой сваркой в защитных газах и сваркой электронным лучом в вакууме. Типы сварных швов, которыми соединяются между собой элементы оболочек продольные прямолинейные (в цилиндрических и конических оболочках), кольцевые, экваториальные, меридиональные, круговые криволинейные (в цилиндрических, конических и сферических оболочках).

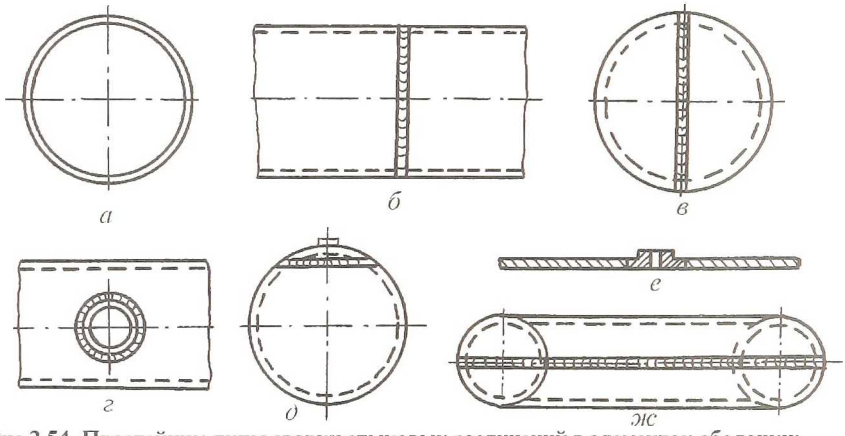


Рис.2.54. Простейшие типы сварки стыковых соединений в элементах оболочки: а, б - продольный и кольцевой швы в цилиндрической оболочке; в - кольцевой шов в сферической оболочке; г круговые швы в цилиндрической оболочке; д - то же, в сферической оболочке; е - то же, в плоском листе; ж - кольцевой шов в торовой оболочке

Например, для тонких оболочек характерны повышенные требования как к форме поверхности оболочек после сварки, так и к несущей способности соединений в конструкциях. Установлено, например, что даже незначительные геометрические отклонения стыкуемых кромок вызывают заметное снижение прочности при статических нагрузках. Диапазон размеров оболочковых конструкций чрезвычайно велик. К категории тонких можно отнести такие, у которых отношение радиуса кривизны поверхности к толщине, по крайней мере, больше 100. В таких оболочках возможны значительные перемещения поверхности уже в процессе сварочного процесса. Эти перемещения осложняют ведение сварки, ухудшают качество и внешний вид шва, снижают несущую способность конструкции.

Наиболее эффективным способом предотвращения перемещений при сварке кольцевых швов оказывается прижатие кромок к подкладному кольцу роликом (рис.2.55, а) [33], перекатывающимся по поверхности стыка непосредственно перед сварочной дугой. Подобный прием закрепления кромок был эффективно использован при сварке стыкового шва тонких стальных листов. Давление, передаваемое на ролик, создается пружинным механизмом. Прижимное устройство монтируется на стандартном консольном автомате, напри-

мер, АКР-2. Приспособление имеет такую схему передачи силы на ролик, при которой не возникает крутящий момент в консоли автомата и эксцентриситет в прижимном ролике. Приспособление устанавливается вдоль консоли, и нагрузка, воспринимаемая консольно, передается только по плоскости ее продольной оси. Для прижатия кромок рекомендуется применять двойной ролик (рис.2.55, а) диаметром 23...35 мм. Точка прижатия должна находиться на расстоянии 30...35 мм от оси электрода. С помощью изготовленного приспособления были сварены обечайки (диаметром 2000 мм, толщиной 2,5; 4 и 6 мм) как с присадочной проволокой, так и без нее. Возможность сварки с присадочной проволокой (за один рабочий ход) позволяет практически вдвое сократить время сварки одного стыка.

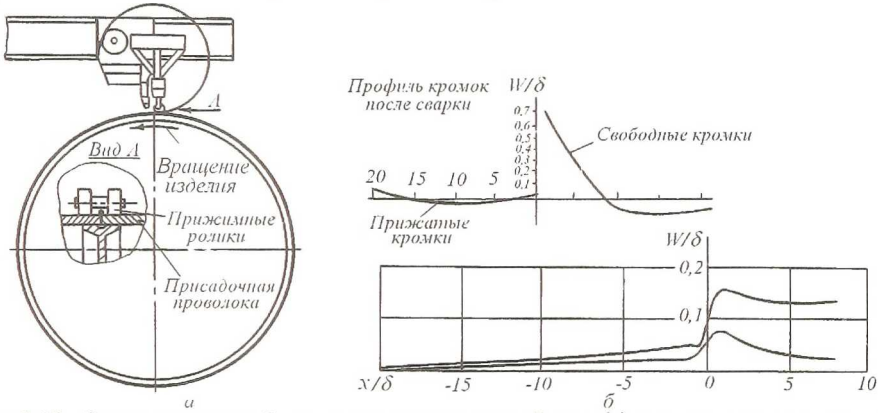


Рис.2.55. Схема и внешний вид прижимного устройства (а) и перемещение кромок кольцевого шва при сварке прижимным приспособлением (диаметр оболочки 2000 мм, толщина 4 мм) (б):

S - толщина обечайки; x - расстояние от оси сварного шва; w - перемещение кромок

На рис.2.55, б представлены результаты записи перемещений кромок при сварке опытной обечайки при давлении на прижимном ролике 1800 Н. Роль прижима сводится к тому, чтобы не дать возможности кромкам оторваться от подкладного кольца перед сварочной горелкой. Небольшой подъем кромок настолько незначителен, что может не приниматься во внимание [33].

Одной из основных причин возникновения дефектов шва в изделиях из алюминиевых сплавов является неприлегание кромок к формирующей подкладке в процессе сварки. Если при выполнении продольных швов плотное прилегание кромок осуществляется прижимами по всей длине стыка, то на кольцевых швах это достигается за счет растягивающих напряжений от натяга кромок при разжиме подкладного кольца.

Применение колец новой конструкции позволило при высоком качестве сборки стыка создать натяг, исключающий перемещение кромок в процессе сварки. Кроме того, использована сплошная

прихватка, выполненная без подачи присадочной проволоки на большой скорости с погонной энергией в 4...6 раз меньшей, чем необходимо для сварки стыка. Снижение погонной энергии за счет увеличения скорости позволило получить малые деформации кромок, которые из-за неполного расплавления остаются достаточно жесткими. Это обеспечивает сохранение устойчивого при сборке положения кромок относительно друг друга, т.е. после скоростной прихватки упругие деформации кромок сохраняются.

К методам снижения остаточных деформаций и напряжений в круговых швах относятся предварительная и послесварочная деформация. В радиальном направлении вблизи стыка действуют растягивающие напряжения, направленные к центру свариваемого кругового элемента. Возникающие при этом тангенциальные напряжения сжатия приводят к потере устойчивости пластины и перемещениям из плоскости. Возникновение радиальных напряжений растяжения в зоне шва на сферических оболочках сопровождается прогибом (провалом) поверхности. Исходя из этих положений можно применить методы по устранению остаточных перемещений, основанные на идее снижения радиальных напряжений [33].

Применительно к пластинам снижение напряжения необходимо для обеспечения их устойчивости. Это снижение можно осуществить с помощью радиального перемещения. В пластинах зона кругового отверстия подвергается выштамповке на некоторую величину (рис.2.56, а). Затем накладывается круговой шов, в результате чего происходит частичное уменьшение высоты (рис.2.56, б) первоначальной выштамповки. После этого зона выштамповки осаждается в плоскость пластины (рис.2.56, в). Сочетание двух операций предварительной пластической деформации и послесварочной осадки для пластины является обязательным, так как напряжения, вызывающие потерю устойчивости кромок, весьма незначительны, и снижение их необходимо для устранения самой возможности потери устойчивости. Иными словами, снижение остаточных напряжений в пластине неотделимо от устранения остаточных перемещений, вызванных потерей устойчивости.

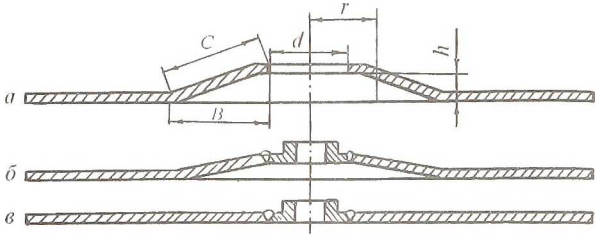


Рис.2.56. Предварительная выштамповка и последующая осадка в пластинах

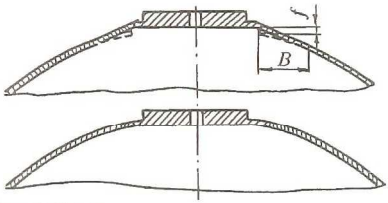


Рис.2.57. Зона кругового отверстия на оболочке после выштамповки и после сварки

Применительно к сферическим оболочкам можно ограничиться только первой операцией, а именно выштамповкой зоны кругового отверстия на величину ожидаемого прогиба в направлении, обратном ему (рис.2.57). В оболочках наличие остаточных напряжений допустимо, так как сварочные деформации могут быть устранены без изменения поля напряжений. Лишь в специальных случаях послесварочная осадка может быть рекомендована в случаях весьма пологих оболочек.

Для большинства реальных прецизионных сварных конструкций, в особенности с большим числом разнообразных сварных соединений, прогнозирование и предупреждение деформирования во времени, как правило, не позволяет обеспечить на требуемом уровне размерную стабильность. В этом случае доминирующее значение для всех без исключения ответственных высокопрочных конструкций имеют методы обработки уже готовых сварных конструкций с целью обеспечения их долговременной размерной стабильности зачастую в жестких условиях эксплуатации.

Приведем краткое описание и характеристики с точки зрения применимости специальных стабилизирующих послесварочных методов обработки сварных конструкций и их соединений.

Пластические деформации укорочения, возникающие при сварке в зоне шва и прилегающей области, приводят, как известно, к местному остаточному укорочению в продольном направлении. Для снятия напряжений в сварном шве каждое продольное волокно зоны пластических сварочных деформаций необходимо удлинить настолько, насколько оно укоротилось при сварке. А так как все укорочения волокон поперечного сечения шва имеют различную длину, для полного устранения напряжений им должна быть сообщена и различная деформация пластического удлинения. Вполне естественно, что осуществить такую неравномерную по поперечному сечению сварного соединения деформацию невозможно ни одним из существующих методов, за исключением высокотемпературного отпуска конструкции. Такое перераспределение достигается осадкой при обкатке некоторой части зоны пластического сварного укорочения по толщине. В результате осадки происходит равномерное удлинение металла и частичная или полная компенсация сварочных деформаций укорочения. Причем, если обкатке подвергается более широкая зона в сравнении с зоной пластического укорочения, устранение напряжений может быть и неполным. Для этого требуется меньшая сила, чем при устранении деформаций обкаткой только по шву.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что метод обкатки может быть взят за основу при разработке специальных методов размерной стабилизации прецизионных сварных конструкций, поскольку при рациональном выборе зоны обкатки и режимов обработки можно довести уровень остаточных напряжений до некоторого минимума и, что самое главное, перевести растягивающие напряжения в сжимающие и наоборот.

Ударное деформирование шва для устранения сварочных напряжений и деформаций представляет собой не что иное, как последовательно повторяющуюся осадку металла. Скорости деформирования металлов по их применению могут быть условно разделены на три диапазона:

1) малые от 1 до 7 м/с, верхний предел соответствует обычной прокатке;
2) средние от 8 до 100 м/с, наиболее широко применяемые;
3) высокие более 100 м/с.

Наиболее эффективными являются скорости второго и третьего диапазонов. Целесообразно применение высокоскоростной проковки в сочетании с последующей термической обработкой. При этом происходит более эффективное снижение остаточных напряжений, чем при чистой термообработке. Однако применять процесс проковки целесообразно, главным образом, для тонколистовых конструкций из легких сплавов, как, впрочем, и обкатку сварных соединений.

Сущность способа снятия остаточных сварочных напряжений в сварных конструкциях путем их механического вибрирования заключается в создании с помощью механических вибраторов в сварных конструкциях после сварки переменных напряжений определенного значения. Виброобработка осуществляется, как правило, на резонансных или близких к резонансным частотах в течение определенного промежутка времени. В ряде случаев виброобработку применяют вместо термической обработки, что экономичнее примерно в 10 раз. Вибрация не оказывает влияния на остаточные напряжения некоторых материалов, например, некоторых алюминиевых сплавов. Наилучшие результаты достигаются на сталях с высоким или низким содержанием углерода, а также на коррозионно-стойких сталях и цирконии.

Высокотемпературная термическая обработка сварных конструкций отжиг или отпуск является наиболее радикальной с точки зрения снижения остаточных сварочных напряжений и стабилизации структуры.

Восстановление форм сварных конструкций, утраченных в результате усадки металла при сварке, производят путем отпуска конструкций в зажимных приспособлениях в следующих случаях: когда искажение формы конструкции носит сложный характер и

трудно установить приемы правки, позволяющие устранить возникшие перемещения, например, пропеллерность гибких элементов; когда невозможно использовать другие методы правки из-за недоступности зон, которые должны быть подвергнуты воздействию, или из-за отсутствия специализированного оборудования; если требуется высокая точность геометрических форм сварной конструкции при одновременном устранении остаточных напряжений.

Специфика производства сварных конструкций привела к развитию различных видов отпуска, отличающихся между собой по организационно-техническим признакам, ввиду применяемого оборудования и очередности. Наибольшее распространение получил общий отпуск, при котором вся деталь, узел конструкции или часть детали целиком помещаются в печь и проходят отпуск. Характерной особенностью общего отпуска является примерно одинаковая во всех точках детали температура в процессе выдержки.

Местный отпуск состоит в нагреве отдельных участков сварной конструкции по необходимому термическому циклу обработки. Средства нагрева весьма многообразны: твердое топливо, газовое пламя, ток промышленной и высокой частоты, ток, проходящий через нагреваемую деталь и др. Конструктивное оформление нагревательных устройств также весьма многообразно: переносные, приспособленные к форме термически обрабатываемой детали; гибкие, позволяющие придать нагревательному элементу необходимую форму; специально создаваемые на период термической обработки устройства.

Проводя местный отпуск только с целью улучшения свойств металла, обычно стремятся получить также и более низкие напряжения. Если одним из основных требований является уменьшение остаточных напряжений, то особое внимание уделяется условиям местного отпуска. В таких случаях могут быть использованы следующие приемы [33].

1. Выбор достаточно широкой зоны равномерного нагрева для того, чтобы собственные напряжения при стыковании образовались в основном за пределами сварного соединения. Такой прием часто используют при местной термической обработке элементов стержневого типа, соединенных сваркой .
2. Использование высокой гибкости термообрабатываемого элемента, сокращение которого при остывании не вызовет образования значительных собственных напряжений. При термообработке труб и оболочек такой прием весьма эффективен.
3. Создание при термообработке такой формы температурной кривой, которая обеспечит невысокие остаточные напряжения.
4. Проведение одновременного нагрева двух или нескольких стыков при термообработке в замкнутом контуре.

5. Уменьшение тепловложений с целью снижения реактивных сил, если термическая обработка проводится в жестком контуре (заделке) или если в замкнутом контуре невозможно нагреть симметричный участок.

Температура отпуска является решающим фактором в достижении необходимого уровня снижения напряжений. Она должна устанавливаться в каждом отдельном случае на основании испытаний на релаксацию в зависимости от марки металла и допустимых остаточных напряжений. В обычных случаях при выборе температуры отпуска, обеспечивающей значительное снижение напряжений, можно ориентироваться на данные, приведенные ниже:

Магниевые сплавы	523...573 К
Алюминиевые сплавы	523...573 К
Титановые сплавы	823...873 К
Углеродистые низко- и среднелегированные стали	853...953 К
Аустенитные стали	953...1323 К
Ниобиевые стали	1373...1473 К

В различных зонах сварного соединения остаточные напряжения разные. По мере нагрева соединения снижение их происходит с различной скоростью деформации, зависящей от соотношения исходного уровня напряжений и диаграммы материала при повышенной температуре. Поэтому уровень напряжений в зоне пластических деформаций сварного шва выравнивается в процессе нагрева.

При термообработке сварных конструкций в приспособлениях, фиксирующих их размеры и форму, обычно не возникает проблем, связанных с определением продолжительности отпуска. Для снятия напряжений применяют кратковременный нагрев до температур, при которых упругие свойства резко уменьшаются. При этом происходит снятие напряжений как от сварки, так и от фиксации конструкции в приспособлении. Обычно общая продолжительность отпуска тонкостенных конструкций толщиной до 10 мм не превышает 60 мин, если наряду со снятием напряжений и восстановлением формы конструкции не преследуются другие цели (искусственное старение и т.д.).

На основании изложенного можно прийти к выводу, что эффективность применения того или иного метода зависит от таких многочисленных факторов, как физико-механические свойства металла, исходные остаточные напряжения, форма и размеры изделия, вид обработки, тип соединения, себестоимость и техническое оснащение предприятия.

2.7. Контроль качества сварных соединений

Высокое качество соединений зависит от уровня и состояния технологического процесса производства. Обнаружение дефектов

служит сигналом не только к отработке продукции, но и к оперативной корректировке технологии. Основное воздействие контроль должен оказывать именно на технологию производства, обеспечивая за счет оперативной обратной связи предупреждение дефектов и брака продукции [59].

В соответствии с ГОСТ 15467-79 под дефектом понимают каждое отдельное несоответствие продукции (изделия) установленным требованиям.

Классификацию дефектов производят по различным признакам.

1. По степени влияния дефектов на работоспособность изделий.
2. По использованию правил, методов и средств контроля.
3. По природе возникновения (технологическим признакам).

В зависимости от этапа возникновения дефекты можно разделить на группы:

- конструктивные дефекты, вызванные ошибками при разработке конструкции, а также несовершенством конструкторской документации;
- производственно-технологические дефекты, связанные с отклонениями в технологическом процессе;
- эксплуатационные дефекты, появившиеся в процессе эксплуатации изделия;
- аварийные дефекты, возникшие в результате резких отклонений в режимах эксплуатации изделия.

В процессе сварки дефекты могут возникать как на поверхности (наружные), так и внутри шва (внутренние).

Наружные дефекты, в свою очередь, подразделяются на дефекты формы сварных швов, подрезы, наплывы и натеки, кратеры и прожоги. Дадим краткую характеристику этим дефектам.

Дефекты формы сварных швов - это несоответствие конструктивных элементов сварных швов указанным в чертежах. Форма и размеры швов зависят от толщины свариваемого металла и способа сварки и задаются техническими условиями и стандартами.

Обычно при сварке плавлением регламентируются ширина шва e и подварки e_1, высота усиления g и подварки g_1 для стыковых швов (рис.2.58, а), катет шва K и высота расчетного сечения h_p для угловых швов (рис.2.58, б). Швы могут иметь неравномерную ширину и высоту по длине, бугры и пр. Дефекты формы швов могут получаться вследствие неправильной подготовки кромок свариваемых изделий, неправильной сборки под сварку (неравномерные зазоры), отступлений от заданной технологии, низкой квалификации сварщиков и т.п.

Подрезы представляют собой углубления в месте перехода от наплавленного металла к основному (рис2.59), приводящие к умень-

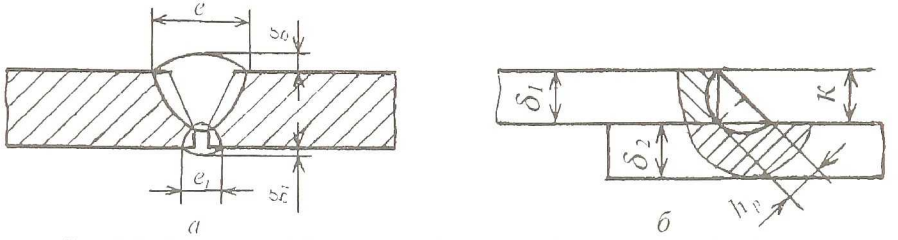


Рис.2.58. Регламентируемые геометрические характеристики сварных швов

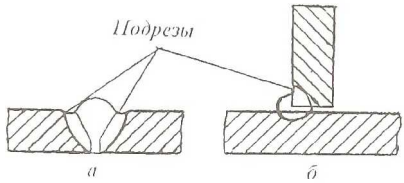


Рис.2.59. Подрезы:
а - в стыковом шве; б - в угловом шве таврового сечения

шению рабочего сечения шва. Кроме того, они являются концентраторами напряжений. Причины образования подрезов: сварка с повышенной тепловой мощностью, низкая квалификация сварщиков и др.

Наплывы и натеки металл, наплывший на непрогретый основной металл около кромок сварного шва и не сплавившийся с ним. Наплывы часто сопровождаются более серьезными дефектами (трещинами, непроварами), скрытыми под наплывшим металлом. Поэтому наплывы необходимо удалять (срубать) и после зачистки заваривать заново. Основной причиной образования наплывов является смещение электрода на одну из свариваемых кромок, неправильно выбранный режим сварки (малая скорость сварки, большая скорость плавления электрода и т.п.), недостаточная квалификация сварщика и др.

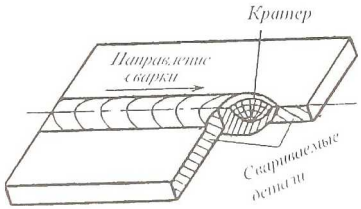


Рис.2.60. Кратер в стыковом шве

Кратеры углубления в конце шва (рис.2.60), образующиеся вследствие недостаточного заполнения металлом сварочной ванны при резком прекращении действия источника теплоты (сварочной дуги, электронного луча и др.). Кратеры уменьшают рабочее сечение шва, снижают его прочность и служат очагом появления трещин, поэтому подлежат обязательной подварке.

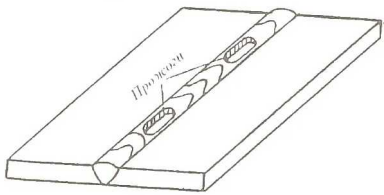


Рис.2.61. Прожог

Прожоги сквозное проплавление свариваемых элементов конструкции (рис.2.61). Причины образования прожогов: чрезмерные зазоры между кромками свариваемых элементов, чрезмерный сварочный ток, малая скорость сварки и др. Прожоги являются недопустимыми дефектами и требуют обязательного исправления.

Внутренние дефекты также подразделяются на поры и шлаковые включения, непровары и трещины.

Поры (пористость) замкнутые полости размером до 2...3 мм (обычно сферической формы), заполненные газами, химически не взаимодействующими с расплавленным металлом (например, водородом). В процессе кристаллизации часть газов, попавших в сварочную ванну, не успевает выйти на поверхность и остается в шве, образуя замкнутые газовые поры или выходящие на поверхность свищи. Причинами образования пор являются загрязнение кромок изделия ржавчиной, маслами и т.п., влага, содержащаяся в обмазках, флюсах и защитных газах, высокая скорость кристаллизации металла сварочной ванны и т.п. Поры уменьшают рабочее сечение шва, снижают прочность и плотность сварных соединений. Число пор и их размеры, допустимые на единицу длины шва, указываются в технической документации на изготовление конкретного изделия.

Шлаковые включения

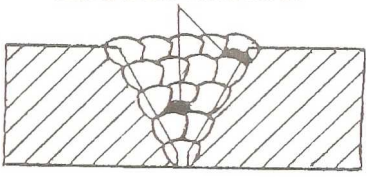


Рис.2.62. Шлаковые включения в многослойном шве

Шлаковые включения (рис.2.62) небольшие полости, заполненные шлаками, окислами и др. Причинами образования шлаковых включений являются низкая жидкотекучесть расплавленного шлака, плохая зачистка от шлака наплавленного металла предыдущего слоя при многослойной сварке, большая скорость кристаллизации металла сварного шва и некоторые другие. Шлаковые включения, так же как и поры, могут быть допустимыми дефектами. Число, вид и размеры шлаковых включений, допустимых на единицу длины шва, указывается в технической документации.

Непровары это несплошности на границах между основным и наплавленным металлом или незаполненные металлом полости в сечении шва. Непровары образуются при недостаточной тепловой мощности сварочной дуги, чрезмерной скорости сварки, неправильной разделке кромок свариваемых изделий, вследствие плохого удаления шлака при многослойной сварке, низкой квалификации сварщика и т.п. Непровары снижают работоспособность сварного соединения за счет ослабления рабочего сечения сварного шва и создания концентрации напряжений в шве. Непровар является одним из наиболее опасных дефектов сварки, особенно для конструкций, работающих при вибрационных и динамических нагрузках, и поэтому подлежит исправлению.

Трещины представляют собой частичное местное разрушение металла в сварном соединении.

В зависимости от размеров трещины подразделяются на макротрещины, имеющие сравнительно большие размеры по глубине,

протяженности и ширине раскрытия, и микротрещины, которые невозможно обнаружить невооруженным глазом. В процессе эксплуатации трещины могут развиваться, что, в свою очередь, может привести к разрушению сварной конструкции.

По расположению относительно сварного шва трещины могут быть продольными и поперечными, внутренними и наружными, могут располагаться в сварном шве, в зоне термического влияния и в основном металле.

В зависимости от происхождения трещины могут быть горячими или холодными. Трещины являются наиболее опасным и недопустимым дефектом и подлежат обязательному исправлению.

Высокое качество сварных соединений может быть обеспечено только в том случае, если качество исходных материалов (основного металла, электродов, сварочной проволоки, флюсов, защитных газов и т.д.) удовлетворяет предъявляемым к ним требованиям.

Сварочную проволоку проверяют на чистоту поверхности, наличие покрытий, нежелательных для данного процесса сварки, расслоений и т.д. Выполняют пробную сварку, применяя соответствующие флюсы или защитный газ, для установления качества материалов по тем же показателям, что и для электродов. Защитные газы проверяют на наличие вредных примесей и влаги.

Свариваемость оказывает существенное влияние на качество изделий, поэтому проверка исходных материалов на свариваемость проводится до принятия решения об использовании материала в сварной конструкции. Свариваемость контролируют в двух случаях: 1) при выборе материалов и разработке технологии сварки, т.е. при подготовке производства на стадии проекта; 2) при допуске материалов в производственный цикл, т.е. при технологической подготовке производства.

Контроль технологии изготовления сварных конструкций включает проверку заготовок, подготовленных к сварке, и сборки изделий под сварку. У подготовленных к сварке заготовок проверяют размеры и форму разделки кромок, а также отсутствие на их поверхности загрязнений.

В собранных узлах проверяют основные габаритные размеры, зазоры в стыках и смещение свариваемых кромок, качество прихваток.

Режимы сварки контролируют в первую очередь по силе тока, напряжению и скорости сварки в установленных пределах. Контроль ведут визуально по приборам и внешнему виду сварного шва. При изготовлении ответственных конструкций ведут непрерывную запись параметров режима с помощью самопишущих приборов. При операционном контроле необходимо обращать внимание на строгое соблюдение последовательности и режимов сварки изделия в целом, так как качественное выполнение

сварных соединений отдельных элементов еще не гарантирует высокого качества всей конструкции.

Все способы контроля качества сварных швов и соединений можно разделить на две основные группы: разрушающие способы контроля и неразрушающие способы контроля.

Разрушающие способы контроля предназначены для определения влияния характера и размеров дефектов на работоспособность сварных соединений. Разрушающие способы контроля включают в себя химический анализ, металлографические исследования макро- и микроструктуры, испытания на растяжение, изгиб, срез, испытания на удар, определение твердости, иногда гидравлические испытания сварных изделий с их разрушением и некоторые другие виды испытаний.

Неразрушающие способы контроля предназначены для определения характера, места расположения и размеров как наружных, так и внутренних дефектов. С целью выявления наружных дефектов наиболее часто применяются следующие виды контроля: внешний осмотр и обмеры сварных швов; контроль керосином; контроль аммиаком; контроль гидравлическим давлением (гидравлическое испытание); контроль воздушным давлением (пневматическое испытание); контроль вакуумированием; контроль газоэлектрическими течеискателями, люминисцентная и цветная дефектоскопия. Для выявления внутренних дефектов применяют следующие виды неразрушающего контроля: радиационный контроль; ультразвуковой контроль и др.

Внешний осмотр и обмеры сварных швов наиболее простые и широко распространенные способы контроля. Они являются первыми контрольными операциями по приемке готового сварного узла или изделия. Этим видам контроля подвержены все сварные швы независимо от того, как они будут испытаны в дальнейшем.

Внешним осмотром сварных швов выявляют подрезы, наплывы, прожоги, непровары, наружные трещины, поры и т.п. Визуальный осмотр производят как невооруженным глазом, так и с применением лупы с увеличением до 10 раз. Осматривать швы необходимо по всей их протяженности и, если возможно, со всех сторон.

Обмеры сварных швов позволяют косвенно судить о качестве сварного соединения: недостаточное по сравнению с основным металлом сечение шва уменьшает его прочность, а слишком большое увеличивает внутренние напряжения и деформации. Размеры швов проверяют в зависимости от типа соединения. У стыковых швов проверяют ширину и высоту усиления и подварки, у угловых катет. Контроль выполняют либо обычными измерительными инструментами, либо специальными шаблонами. На рис.2.63 показано применение шаблонов для контроля геометрических размеров стыковых *2* и угловых *1* швов. Для контроля разделки кромок или подготовки изделий под сварку используются шаблоны других конструкций.

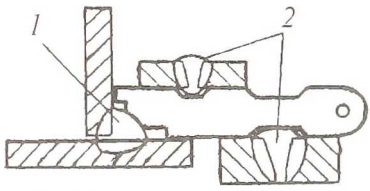


Рис.2.63. Пример применения шаблона для контроля геометрических размеров

После проведения внешнего осмотра и исправления недопустимых дефектов сварные соединения подвергают контролю другими методами для выявления внутренних дефектов.

Контроль керосином ("керосиновая проба") основан на способности керосина проникать через малые неплотности металла. Для проведения контроля сварные швы покрываются водным раствором мела (350...450 г молотого мела на 1 л воды) с той стороны, которая более доступна для осмотра. После высыхания покрытой поверхности обратная сторона шва смачивается керосином. Неплотности швов выявляются по появлению желтых точек или полосок керосина на меловом покрытии. Появление отдельных точек указывает на наличие сквозных пор (свищей), а полосок - на наличие сквозных трещин. Если в течение 30...60 мин такие точки или полоски не появятся, то такие швы можно считать удовлетворительными.

Контроль воздушным давлением (пневматическое испытание) применяют для контроля сосудов и трубопроводов, работающих под давлением, с целью контроля общей герметичности сварного изделия. Изделия небольших размеров герметизируют, погружают в ванну с водой и создают в них давление, на 10...20% превышающее рабочее, используя для этой цели воздух, азот или инертные газы. Неплотности определяют по появлению пузырьков газа в воде. Крупногабаритные сварные конструкции, которые не могут быть помещены в резервуар с водой, испытывают следующим образом. Их герметизируют и создают в них испытательное давление. После этого сварные швы промазывают пенным индикатором (обычным водным раствором мыла), который пузырится в местах неплотностей.

При испытании сжатым газом следует соблюдать правила техники безопасности: сварные сосуды необходимо испытывать в изолированном помещении с ограждениями на случай разрыва сосуда.

Контроль гидравлическим давлением (гидравлическое испытание) применяют при проверке прочности и плотности различных сосудов, работающих под избыточным давлением. Перед испытанием сварные швы с наружной стороны тщательно обтирают ветошью или обдувают сжатым воздухом до получения сухой поверхности. Затем сосуд заполняют водой. После этого в сосуде гидравлическим прессом создают давление, равное рабочему. Дефектные места определяются по появлению течи, просачиванию воды в виде капель, запотеванию на поверхности шва или вблизи от него. Если дефекты не обнаруживаются, давление увеличивается до $P_{ис}=1{,}25P_{раб}$ для сосудов и $P_{ис}= 1{,}5P_{раб}$ для трубопроводов. Под этим давлением сосуд или

трубопровод выдерживают 5 мин, затем давление снижают до $P_{раб}$ и обстукивают соединение молотком со сферической головкой на расстоянии 15...20 мм от кромки шва. После этого швы осматривают еще раз.

Сущность **радиационных способов контроля** состоит в просвечивании сварных соединений рентгеновским или γ-излучениями.По способу получения первичной информации различают три основных способа радиационного контроля: радиографический, радиоскопический и радиометрический.

Под радиографическим понимают способ радиационного контроля, при котором радиационное изображение просвечиваемого объекта проецируется на рентгеновскую пленку или другой носитель, где преобразуется в фотографическое изображение. Радиографический метод является самым распространенным методом радиационной дефектоскопии вследствие его высокой чувствительности, простоты и возможности документального подтверждения результатов контроля.

В табл.2.2 приведены толщины некоторых материалов, которые можно контролировать радиографическим методом.

Таблица 2.2.

Области применения источников ионизирующего излучения в радиографии

Излучение		Диапазон контролируемых толщин, мм		
Рентгеновское	γ-излучение	Al	Ti	Fe
10-60 кВ	Am - 241	до 50	до 8	до 4
60-120 кВ	Tm 170	3-70	2-40	1-20
120-200 кВ	Se - 75	20-150	6-80	3-50
150-300 кВ	Jr - 192	40-250	10-120	5-80
200-400 кВ	Cs - 137	50-350	20-150	10-120
300-1000 кВ	Co - 60	200-500	60-300	30-200
3-6 МэВ				
6-15 МэВ		250-1400	150-800	100-500
15-50 Мэв				

Примечание: кВ напряжение рентгеновского аппарата, киловольты; МэВ - энергия излучения ускорителя, мегаэлектронвольты.

Радиоскопический метод контроля (радиационная интроскопия) состоит в просвечивании контролируемого объекта ионизирующим излучением, преобразовании скрытого радиационного изображения объекта в светотеневое или электронное и передаче этого изображения либо непосредственно оператору, либо на расстояние с помощью оптики или телевизионной техники для последующего визуального анализа. При радиоскопическом контроле в качестве детекторов излучения используют флуороскопические экраны, сцин-

тилляционные кристаллы, электроннооптические преобразователи, рентген-видиконы, преобразующие рентгеновское изображение объекта непосредственно в видеосигнал без потери информации.

Если контролируемый объект не имеет дефектов, то мощность прошедшего через него излучения одинакова и экран светится равномерно. Если же контролируемый объект имеет дефекты, то мощность излучения, прошедшего через них, больше, чем мощность излучения, прошедшего через бездефектные места (исключение составляют вольфрамовые включения), и на экране появятся участки с более ярким свечением. Поры и шлаковые включения будут выглядеть на экране в виде более ярких пятен, а трещины и непровары в виде более ярких полос.

Этот метод позволяет просматривать внутреннюю структуру контролируемых объектов в процессе их перемещения со скоростью от 0,3 до 2,5 м/мин в зависимости от типа преобразователя и толщины изделия. Производительность радиоскопического контроля в 3...5 раз выше производительности радиографического контроля. Однако по сравнению с радиографическим чувствительность этого метода примерно в 2 раза ниже.

Радиометрический метод контроля состоит в просвечивании контролируемого объекта путем его сканирования узким (коллимированным) пучком ионизирующего излучения с последующим преобразованием с помощью детектора прошедшего излучения в электрический сигнал. После обработки сигнала результаты контроля представляются регистрирующим устройством в виде записи на диаграммной ленте, цифрового кода и т.п. Любая система радиометрического контроля содержит источник излучения, детектор, схему обработки и регистрации информации. В качестве источников излучения обычно применяют гамма-изотопы, ускорители и реже рентгеновские аппараты. Детекторами излучения чаще всего служат сцинтилляционные счетчики и ионизационные камеры.

Радиометрический метод контроля по сравнению с радиографическим имеет более высокую чувствительность, так как контроль ведется только центральной (более "жесткой") частью пучка, и более высокую производительность. К недостаткам этого метода нужно отнести невозможность определения формы и глубины залегания дефектов, а также пригодность для контроля только однотипных деталей простой формы.

С помощью радиометрического метода можно контролировать стальные изделия толщиной от 50 до 500 мм. Сравнивая способы контроля с использованием гамма- и рентгеновского излучения, можно отметить следующее:

- гамма-излучение отличается от рентгеновского более высокой жесткостью, т.е. меньшей длиной волны. Его применяют для обна-

ружения относительно крупных дефектов с размером более 2...4% толщины просвечиваемого металла, а рентгеновское - 1...2%;

- большое преимущество просвечивания гамма-излучением заключается в портативности источника излучения и в возможности просвечивания в местах, недоступных для рентгеновского аппарата.

Поэтому в заводских условиях рекомендуется использовать рентгеновские аппараты, а в монтажных аппараты с гамма-источниками.

Ультразвуковая дефектоскопия (УЗД) основана на свойстве ульразвуковых волн распространяться в средах и отражаться от границ сред или нарушений сплошности (дефектов), обладающих другими акустическими свойствами. В практике ультразвукового контроля используют упругие механические колебания с частотой от 0,5 до 20 МГц. Для возбуждения и приема ульразвуковых колебаний используют ультразвуковые преобразователи следующих основных видов (рис.2.64): прямые (а), излучающие в контролируемое изделие продольные волны перпендикулярно к контактной поверхности; наклонные (б), с помощью которых в изделии возбуждаются поперечные волны под углом к поверхности ввода; раздельно-совмещенные (РС) (в), обеспечивающие ввод в металл продольной волны под углом 5...10° к плоскости, перпендикулярной поверхности ввода.

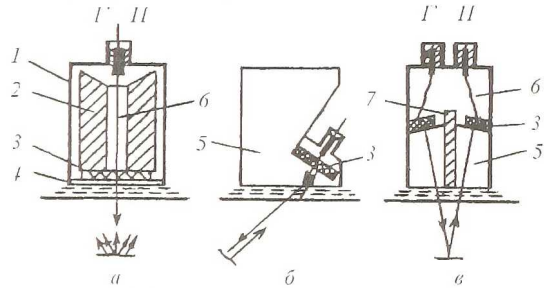


Рис.2.64. Ультразвуковые преобразователи

Преобразователь является сложным электро-акустическим прибором. Основным элементом преобразователя является пьезоэлемент (пьезопластина) *3* в форме диска или прямоугольной пластины. Пьезопластины изготавливают из кварца, цирконата-титаната свинца, титаната бария и др. С рабочей стороны прямых преобразователей на пьезопластине имеется защитное донышко (протектор) *4*, предохраняющее пьезопластину от механических повреждений. С противоположной стороны к пьезопластине приклеен демпфер *2* из материала с большим поглощением ультразвука. Демпфер уменьшает длительность колебания пьезопластины, т.е. способствует получению коротких зондирующих импульсов. Прямой преобразователь размещен в стальном корпусе *1*. В наклонных и РС-преобразователях пье-

зопластина *3* приклеена к призмам *5* из оргстекла, полистирола или других материалов. В этих материалах ультразвук распространяется с относительно небольшой скоростью, что позволяет при относительно малых углах падения вводить поперечные волны в контролируемый металл под большими углами (до 90°). Высокое затухание ультразвука в призме обеспечивает быстрое гашение ультразвуковых колебаний, отраженных от границы с контролируемым металлом.

В РС-преобразователях одна пьезопластина с помощью токоподвода *6* подключена к выводу генератора электрических колебаний *Г* и служит излучателем УЗК, а другая к выводу приемника *П*. Между ними размещен акустический экран *7* (см.рис.2.64, в).

При ультразвуковой дефектоскопии сварных конструкций используют три основных метода, отличающихся один от другого по признаку обнаружения дефекта: теневой, зеркально-теневой и эхо-импульсный.

При любом методе контроля возможно использование двух преобразователей, один из которых обеспечивает излучение УЗК (излучатель *И*), а другой их прием (приемник *П*). Такая схема включения искателей называется раздельной. В то же время для зеркально-теневого и эхо-импульсного методов возможно применение одного искателя (ИП), включенного по совмещенной схеме, при которой один и тот же искатель выполняет функции излучения зондирующих импульсов и приема эхо-сигналов.

Теневой метод (метод сквозного прозвучивания) основан на посылке в контролируемое изделие упругих колебаний и регистрации изменения их интенсивности после однократного прохождения через металл.

Зеркально-теневой метод (контроль однократно отраженным лучом) является разновидностью теневого. При использовании этого метода приемную и излучающую головки устанавливают с одной стороны изделия. Регистрация изменения интенсивности упругих колебаний осуществляется после их отражения от противоположной поверхности. Противоположную поверхность, зеркально отражающую упругие волны, называют донной поверхностью, а отраженный от нее импульс - донным импульсом.

Перед началом проведения контроля головки устанавливают на таком расстоянии, чтобы упругие колебания, введенные в контролируемое изделие *1* (рис.2.65, а) головкой *2*, отразившись от донной поверхности, были восприняты головкой *4*. Если на пути прямой и отраженной волн нет дефектов, то на экране осциллографа *5* появятся два импульса (рис.2.65, а'): зондирующий 6 и донный *7*, незначительно отличающиеся по амплитуде.

Для проведения контроля по всей длине изделия необходимо перемещать обе головки одновременно, сохраняя между ними перво-

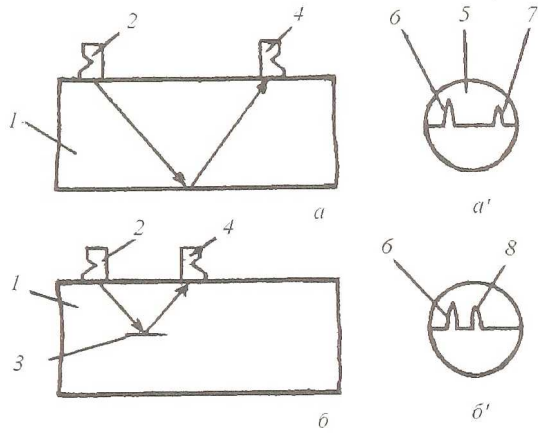


Рис.2.65. Схемы прозвучивания изделия зеркально-теневым методом: а - изделие не имеет дефектов; б - изделие имеет дефект; а', б' - осциллограммы

начально установленное расстояние. Если при перемещении головок на пути прямой или отраженной волны встретится дефект, то в зависимости от его размеров амплитуда донного импульса либо уменьшится, если дефект перекрывает часть упругой волны, либо исчезнет совсем, если дефект полностью перекрывает упругую волну.

Для того чтобы определить место расположения дефекта, необходимо прекратить перемещение излучающей головки *2*, а приемную головку *4* (отметив ее положение) приближать к головке *2*. Если дефект *3* (рис.2.65, б) расположен на пути прямой упругой волны, то в какой-то момент времени головка *4* примет отраженную волну (см. рис.2.65, б) и на экране осцилографа появится импульс от дефекта *8* (рис.2.65, б'). Этот импульс будет расположен ближе к зондирующему импульсу *6*, чем донный (в случае отсутствия дефекта), так как уменьшилось время прохождения упругой волны от излучающей головки до приемной. Зная углы ввода и отражения упругой волны, можно определить место и глубину залегания дефекта.

Если же при перемещении приемной головки в этом направлении на экране осциллографа не появится новый импульс, это будет означать, что дефект расположен на пути отраженной волны. В этом случае для обнаружения дефекта приемную головку *4* необходимо вернуть в отмеченное положение и перемещать излучающую головку *2* в ее направлении до получения на экране осциллятора максимальной амплитуды импульса от дефекта.

Эхо-импульсный метод. Упругие колебания вводят в изделие *1*, как правило, с одной стороны искательной головкой *2*, работающей по совмещенной схеме (рис.2.66 а, б, в). Их посылают в контролируемое изделие один за другим через определенные промежутки времени. Зондирующий импульс УЗК, пройдя сквозь

толщу материала, отражается от противоположной (донной) поверхности изделия и, возвращаясь, частично попадает на пьезоэлемент искательной головки. На экране осциллографа возникает донный импульс 5 (рис.2.66, а').

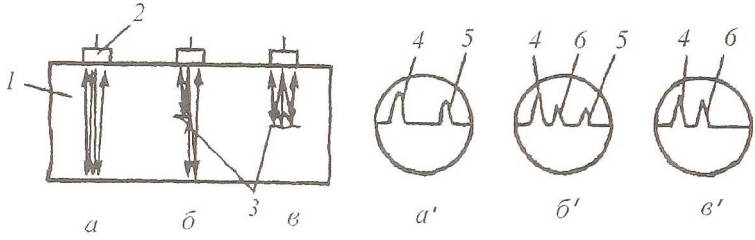


Рис.2.66. Схема прозвучивания изделия эхо-импульсным методом продольными УЗК: а, б, в положения искательной головки при контроле изделия; а', б', в' соответствующие им осциллограммы

При наличии дефекта *3* импульс УЗК отразится от него раньше, чем от противоположной поверхности изделия. Между начальным *4* и донным *5* импульсами возникает промежуточный импульс *6* (рис.2.66, б'). Если дефект полностью перекрывает путь ультразвуковой волне, то на экране осциллографа будет наблюдаться только начальный импульс *4* и импульс от дефекта *6* (рис.2.66, в'). Так как время прохождения луча прямопропорционально пройденному пути, а скорость УЗК для данного материала есть величина постоянная, то расстояние между импульсами *4* и *6* на экране осциллографа представляет собой глубину залегания дефекта в определенном масштабе. Следовательно, на экране осциллографа строится график, по горизонтальной оси которого откладывается время, пропорциональное глубине залегания дефекта, а по вертикальной интенсивность отраженного от дефекта импульса, зависящая от его размеров и ориентации относительно упругой волны. Измеряя с помощью электронного глубиномера время от момента выхода импульса до момента появления эхо-сигнала на экране осциллографа, можно определить расстояние от головки до дефекта $l = Ct/2$, где C скорость УЗК в материале изделия; t - время распространения УЗК до дефекта и обратно.

Эхо-импульсный метод широко применяется для контроля сварных изделий, крупногабаритных сварных изделий сложной формы и др. При этом контроль проводят при одностороннем доступе к изделию. Подготовка сварного соединения к контролю заключается в устранении наружных дефектов, обнаруженных при внешнем осмотре, очистки околошовной зоны от брызг металла, отслаивающейся окалины, краски, грязи, а также доводки ширины выпуклости шва, если это необходимо, до требуемых размеров. Качество обработки поверхности должно соответствовать ГОСТ на проведение ультразвуковой дефектоскопии. Подготовленную поверхность тща-

тельно протирают ветошью и покрывают слоем контактной жидкости (минеральным маслом, солидолом и некоторыми другими).

Поиск дефектов производят путем продольно-поперечного сканирования (перемещения) преобразователя по всей околошовной зоне сначала с одной, а затем с другой стороны. Шаг перемещения преобразователя вдоль продольной оси шва обычно составляет 2...3 мм. В процессе перемещения наклонный преобразователь необходимо непрерывно поворачивать вокруг вертикальной оси на ±15° для того, чтобы обнаружить различно ориентированные дефекты.

Для контроля сварных соединений обычно применяют следующие способы прозвучивания: прямым, однократно отраженным или многократно отраженным лучом.

К основным преимуществам ультразвуковой дефектоскопии относятся высокая чувствительность, мобильность аппаратуры, оперативность в получении результатов, низкая стоимость контроля, отсутствие радиационной опасности.

Зеркально-теневой метод применяют в основном для контроля качества сварных соединений. Зеркально-теневой метод применяют в основном для контроля качества сварных соединений. Описанные способы ультразвуковой дефектоскопии позволяют достаточно надежно определять размеры дефекта и координаты их залегания.

2.8. Сборка-сварка герметичных корпусов летательных аппаратов

Все герметичные отсеки ЛА условно можно разделить на две группы: "сухие" и "мокрые". К первой группе можно отнести рабочие отсеки орбитальных станций, спускаемые аппараты пилотируемых космических кораблей, спускаемые аппараты автоматических КА, приборные отсеки ЛА. Ко второй группе относятся различного типа и назначения баки-емкости ЛА.

Герметичные корпуса ЛА первой группы предназначены для размещения и создания условий нормального функционирования экипажа, оборудования и приборов. СА сочетают в себе функции отсека КА и в то же время самостоятельного атмосферного ЛА. СА автоматических КА могут иметь различную форму (рис.2.67). Особый тип СА составляют спускаемые капсулы, предназначенные для доставки на Землю полезной нагрузки малой массы и объема, например, фото- и кинопленки.

Особенностью сферической формы является максимальный внутренний объем при минимальной внешней поверхности. Центр давления сферы находится в её геометрическом центре. Для обеспечения устойчивости СА и спускаемых капсул при спуске необходимо спустить центр масс на 4...6% длины радиуса в направлении лобово-

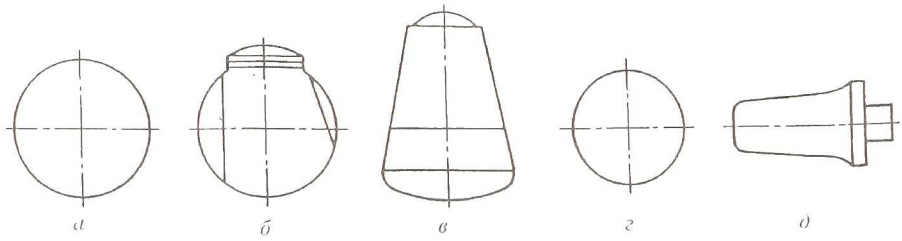


Рис.2.67. Формы спускаемых аппаратов:
а - сферическая (КА "Фотон", "Ресурс"); б - сферическая с гаргротом (КА НИКА); в - коническая ЭКО-НХ; г - сферическая капсула; д - клиновидная капсула

го теплозащитного покрытия от центра сферы для сферического СА, что достигается компоновкой. Коническая форма СА обеспечивает размещение полезной нагрузки, имеющей большую длину, например, фотоаппаратуры без излома оптической оси.

Траектории спуска выбирают с учетом возможностей, создаваемых характеристиками СА, в пределах ограничений по перегрузкам и тепловым режимам, а также требований самой траектории спуска (заданный маневр, точность посадки). Указанные ограничения влияют на характеристики СА и программы управления его движением. Возможности формирования траекторий зависят от выбора аэродинамического качества и баллистического параметра, а управление движением - от их изменения в полете.

При возвращении на Землю необходимо обеспечить торможение, посадку и тепловой режим внутри СА. Способы спуска и приземления выбираются в зависимости от аэродинамического качества СА. Спускаемые аппараты, имеющие малое аэродинамическое качество, осуществляют спуск в атмосфере и приземление с использованием парашютов, двигателей мягкой посадки. СА с достаточно высоким аэродинамическим качеством могут совершать горизонтальную посадку.

В автоматических КА применяется баллистический спуск без использования подъемных сил, без управления по дальности и с большим разбросом точек посадки.

Компоновка СА решает задачу рационального размещения возвращаемой на Землю аппаратуры, основных систем и агрегатов, обеспечивая при этом заданную центровку. Системы и агрегаты СА следует располагать с учетом требований к размещению и взаимовлиянию. Зазоры между приборами должны быть минимальными для обеспечения высокой плотности компоновки, но достаточными для циркуляции воздуха в СА. Это же следует учитывать при прокладке бортовой кабельной сети. По возможности надо избегать образования труднодоступных почти замкнутых объемов, в которых могут возникать невентилируемые зоны.

Силовая оболочка корпуса СА (рис.2.68) изготавливается из свариваемых алюминиевых сплавов. В зависимости от формы СА (сфера, конус) элементы оболочки штампуются и свариваются между собой. Усиливающий оболочку силовой набор приваривается к оболочке точечной сваркой и используется для крепления приборов, агрегатов, кабельной сети и полезной нагрузки [41].

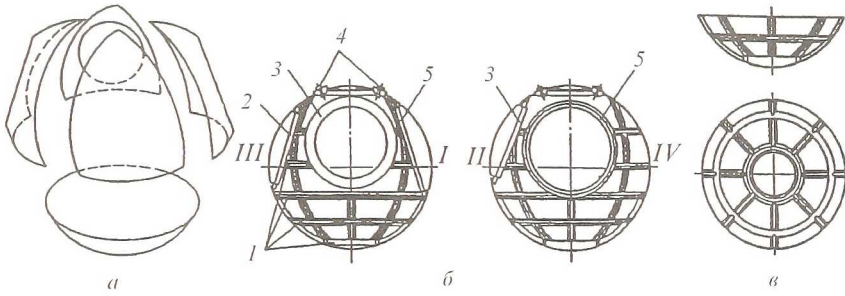


Рис.2.68. Схема технологического членения конструкции корпуса СА КА "Ресурс-Ф2": а - оболочка; б - силовой каркас; в - силовое днище; 1 - силовые шпангоуты; 2 и 5 - силовые шпангоуты люка; 3 - силовой шпангоут люка парашютного контейнера; 4 фланцы крепления системы разделения

В оболочку СА вварены фланцы под иллюминаторы, антенны, узлы для крепления агрегатов снаружи СА. После сварки корпуса плоскости люков подвергаются точной обработке, на них протачиваются канавки под гермоуплотнения.

Приборные отсеки (ПО) могут иметь герметичную и негерметичную конструкцию, в них размещают аппаратуру, которую нецелесообразно помещать в СА или АО (АО - агрегатный отсек). ПО имеют развитые электро- и гидрокоммуникации с другими отсеками, поэтому в общей схеме КА его размещают чаще всего между СА и АО. Иногда применяют дополнительные ПО в виде контейнеров различной конфигурации, которые крепятся к силовой конструкции [41]. Внутри герметичных ПО поддерживаются условия, необходимые для функционирования приборов.

Приборные отсеки могут иметь различную конфигурацию, наибольшее распространение получили схемы, показанные на рис.2.69. Конструкция ПО сварная с эксплуатационными и технологическими разъемами. Корпус состоит из оболочки, подкрепленной шпангоутами и стрингерами. Шпангоуты используются для крепления ПО к другим отсекам КА, к шпангоутам крепятся рамы для установки приборов. В местах герморазъемов на шпангоутах имеются проточки для расположения гермоуплотнений. Гермоуплотнители располагаются обычно на шпангоуте корпуса. В корпус гермоотсеков вариваются гермоплаты для расположения электро- и гидроразъемов и заправочных клапанов.

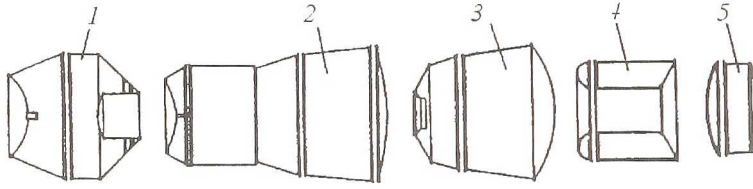


Рис.2.69. Конструктивные схемы ПО:
1 - КА "Ресурс-Ф2"; 2 - КА НИКА; 3 - КА ЭКО-НХ; 4 - навесной торовый отсек; 5 - приборный контейнер "Наука"

Требования, предъявляемые к герметичным корпусам, можно разделить на две группы [71].

Первую группу составляют требования, общие для герметичных корпусов любых КА. Корпус должен обладать необходимым запасом прочности с учетом того, что в процессе эксплуатации он постоянно нагружен внутренним давлением содержащейся в нем газовой среды. Заданный уровень герметичности должен сохраняться на протяжении всего полета КА. К геометрическим параметрам корпусов предъявляются достаточно жесткие точностные требования: допуск на закрутку стыковочных шпангоутов составляет единицы угловых минут, а допуски на большинство размеров корпусов - 0,01...0,05% от их номинальных значений. Допустимая погрешность расположе-ния фланцев по длине корпуса составляет $\leq$ 1 мм, а неплоскостность герметично уплотняемых фланцев и шпангоутов $\leq$0,1 мм.

Во вторую группу входят специфические требования, вытекающие из условий эксплуатации конкретных КА. Например, к герметичным корпусам долговременных орбитальных станций предъявляются повышенные требования в части обеспечения заданной жесткости конструкции и сохранения жесткости неизменной на протяжении полета. Для корпусов СА характерны достаточно жесткие требования к форме наружной поверхности и смещению центра масс аппарата относительно центра давления, обусловленные особенностями процесса спуска аппарата в атмосфере планеты.

Примерные условия для гермоотсеков автоматических КА заключаются в следующем:

- давление воздуха от $4{,}5\cdot10^4$ до $1{,}48\cdot10^5$ Па;
- возможно содержание гелия до 0,01%, который используется при испытаниях на герметичность;
- температура воздуха от 273 до 313 К, если предъявляются повышенные требования по поддержанию температурного режима, то 293±5 К [41].

Отсеки могут вместо воздуха заправляться азотом. Рабочее давление в отсеке может быть понижено до минимально допустимого,

при этом следует учитывать особенности обеспечения теплового режима находящихся внутри приборов.

Герметичность корпусов КА обеспечивается выбором рациональных конструкторско-технологических решений. Детали, входящие в состав герметичных корпусов, изготовляют из холодноштампованных листовых и профильных заготовок, материал которых отличается высокой плотностью и малой газовой проницаемостью. Соединение деталей корпусов друг с другом производится с помощью прочноплотных сварных соединений, что обеспечивает минимальное увеличение массы конструкции.

Основной конструкционный материал, используемый для изготовления герметичных корпусов, алюминиевые сплавы. В производстве ЛА алюминиевые сплавы составляют около 3/4 доли всех материалов.

Как известно, алюминиевые сплавы разделяются на две основные группы: деформируемые и литейные. Деформируемые алюминиевые сплавы в свою очередь разделяются на неупрочняемые термообработкой и термоупрочняемые.

В сварных конструкциях ЛА получили наибольшее распространение деформируемые алюминиевые сплавы, не упрочняемые термообработкой (АМц, АМг, АМг3, АМг5В, АМг6 и др.) и термоупрочняемые (Д19, М40, Д20, ВАД23, В92А, АЦМ и др.), а также алюминий (АД, АД1 и др.).

Литейные сплавы в сварных конструкциях ЛА применяются реже.

К особенностям сварки алюминия и его сплавов следует отнести следующие:

- наличие и возможность образования тугоплавкого окисла ($T_{пл}$ = 2323 К);
- резкое падение прочности при высоких температурах;
- большой коэффициент линейного расширения;
- высокая теплопроводность;
- склонность к возникновению трещин.

В производстве ЛА сварку алюминиевых сплавов плавлением осуществляют в основном электродуговыми способами неплавящимися и плавящимися электродами в защитной среде нейтральных газов аргона и гелия. В последнее время все большее применение находит сварка электронным лучом в вакууме.

Окисные включения в шве появляются в результате наличия пленок, имеющихся на поверхности стыкуемых элементов и присадочной проволоки. Наличие загрязнений на этих поверхностях увеличивает количество окисных включений в швах.

Существует несколько способов очистки поверхности алюминиевых сплавов перед сваркой: химическое травление в

растворе щелочи с последующим осветлением в азотной кислоте, электрополирование, механическая зачистка, включая шабрение, катодное распыление и пр.

В результате взаимодействия со щелочью окисная пленка стравливается с поверхности в течение 2...3 мин. После этого остатки щелочи и продукты реакции смывают с поверхности детали сначала горячей, а затем холодной водой, одновременно протирая их волосяными щетками. Сразу же после промывки детали пассивируют в 20% азотной кислоте, нагретой до температуры 333...334 К. За 5...7 мин пребывания в растворе поверхность детали покрывается новым, более плотным слоем окиси алюминия. Извлеченные из азотной кислоты детали промывают в холодной, а затем в горячей воде и сушат подогретым воздухом.

Первый способ достаточно производительный и обязательный для всех свариваемых деталей, но не всегда обеспечивает необходимое качество сварных соединений, особенно в тех случаях, когда выдержка металла превышает несколько суток. В атмосферных условиях толщина образованной пленки увеличивается, хотя и более медленно, поэтому подготовленные к сварке детали необходимо сварить в течение 24 час, а сварочную проволоку использовать в течение 8 час. Различие в сроке хранения подготовленных к сварке деталей и проволоки обусловлено тем, что непосредственно перед сваркой соединяемые кромки деталей дополнительно очищают от окисных пленок механическим путем шабрением. Образовавшаяся после шабрения тончайшая пленка окиси легко удаляется сварочной дугой, горящей в среде инертных газов, что обеспечивает более стабильные свойства соединений. Хорошее качество соединений дает электрополирование или механическая зачистка поверхности шабрением. Однако производительность процесса недостаточна. Возможна очистка катодным распылением.

Известно, что на качество сварных швов значительно влияет состояние поверхности присадочной проволоки. Присадочная проволока подготавливается перед сваркой только химическим путем и включает следующие основные операции: обезжиривание, травление, дополнительную обработку поверхности после травления с целью повышения плотности пленки и уменьшения запаса имеющейся в ней влаги. Обезжиривание и травление проволоки проводят по технологии, принятой для обезжиривания и травления поверхности основного металла. Дополнительная обработка может быть различной: вакуумная сушка проволоки, химическое или электрохимическое полирование поверхности.

Для сварки алюминиевых сплавов в среде защитных газов применяют аргон первого состава, гелий или смеси аргона с гелием. При сварке в защитных газах окисная пленка удаляется своеобразным

воздействием электрического тока в процессе горения дуги. Механизм разрушения окисных пленок с поверхности свариваемых кромок при использовании защитных газов аргона и гелия неодинаков. Механизм воздействия электрического тока при аргонодуговой сварке состоит в том, что движущиеся с большой скоростью положительные ионы бомбардируют поверхность свариваемых кромок и сварочной ванны, разрушают пленку окиси и путем катодного распыления удаляют её.

При сварке постоянным током обратной полярности очищающее действие тока наблюдается на протяжении всего процесса горения дуги, а при сварке переменным током только в те периоды, когда изделие является катодом (табл.2.3).

Таблица 2.3.

Влияние полярности тока и защитного газа на допустимые токи вольфрамового электрода

Род тока	Защитный газ	Сила сварочного тока (А) при диаметре электрода, мм		
		1-2	3	4
Постоянный прямой полярности	Аргон	65-150	140-180	250-340
	Гелий	50-110	100-140	200-300
Постоянный обратной полярности	Аргон	10-30	20-40	30-50
	Гелий	10-20	15-30	20-40
Переменный	Аргон	20-100	100-160	140-220
	Гелий	10-60	60-100	100-160

Условия горения дуги переменного тока при сварке вольфрамовым электродом в полупериоды разной полярности отличаются. В полупериод, когда вольфрам является катодом, благодаря мощной термоэлектронной эмиссии проводимость дугового промежутка возрастает, увеличивается ток, и снижается напряжение дуги.

В полупериод, когда катодом становится изделие (холодный катод), проводимость дугового промежутка снижается, уменьшается сила тока дуги и возрастает напряжение. В результате этого синусоида тока дуги оказывается несимметричной, что равносильно действию в цепи дуги некоторой постоянной составляющей тока. Это явление объясняется различием условий существования дуги на электродах. Напряжение на них всегда ниже в те полупериоды, когда температурах электроды.

С увеличением составляющей постоянного тока нарушается стабильность процесса сварки, резко ухудшается чистота поверхности шва, появляются подрезы, чешуйчатость и другие дефекты, снижающие прочность сварных соединений и пластичность металла шва.

Поэтому при сварке неплавящимся электродом для устранения или уменьшения постоянной составляющей в сварочную цепь вводится емкостное сопротивление, а для облегчения повторного зажигания дуги добавляется индуктивное сопротивление, что приводит к сдвигу фаз между напряжением холостого хода источника питания и током дуги. Повторное зажигание дуги облегчается, поскольку в этом случае в момент перехода тока через нулевое значение напряжение холостого хода не равно нулю. В связи с этим для сварки неплавящимся электродом алюминиевых сплавов применяются в большинстве случаев специализированные источники питания, имеющие специальную аппаратуру для повышения стабильности горения дуги.

Сварка алюминиевых сплавов может осуществляться трехфазной дугой вольфрамовым электродом. Трехфазная дуга отличается высокой устойчивостью горения и более высокой, по сравнению с однофазной, производительностью процесса за счет повышения проплавляющей способности. Использование трехфазной дуги при той же стойкости вольфрамовых электродов позволяет повысить мощность теплового потока в 1,5...2 раза [34].

При сварке трехфазной дугой имеется возможность в широких пределах регулировать характер тепловложения в кромки за счет перераспределения мощности путем изменения соотношения тока между электродами и деталью, изменения угла между электродами, изменения положения электродов относительно плоскости стыка. Наибольшее проплавление стыка при сохранении достаточной устойчивости горения дуги достигается при отношении тока между электродами к току между электродами и деталью, равном 1,5...1,7. Широкие возможности регулирования теплового потока трехфазной дуги открывают перспективы для сварки алюминия и его сплавов в довольно широком диапазоне толщин. Трехфазную дугу используют в основном для автоматической сварки стыковых соединений в нижнем положении. Без разделки кромок за один ход сваривают металл толщиной до 30 мм.

Плазменная сварка (сжатой дугой) постоянным током обратной полярности обеспечивает высокую плотность тока в столбе дуги, большую концентрацию энергии, которые позволяют повысить скорость сварки, уменьшить зону термического влияния и деформацию конструкций по сравнению с аргонодуговой сваркой переменным током.

Процесс горения дуги весьма устойчив, а малая чувствительность к колебаниям её длины значительно облегчает операцию сварки. Вольфрамовый электрод для повышения его стойкости в плазмотроне запрессовывают в охлаждаемую медную обойму. Рабочий конец вольфрамового электрода должен быть чистым и заточен заподлицо с медной обоймой. Глубина погружения медно-вольфрамового электрода относительно среза формирующего

сопла составляет 1,5...2,5 мм. При более глубоком погружении электрода в сопло затрудняется возбуждение дежурной дуги, а также возбуждение и горение основной дуги. Длина факела дежурной дуги поддерживается в пределах 5...8 мм.

Для плазменной сварки алюминия на постоянном токе обратной полярности рекомендуется применять установки типа УПС 501У4 (токи до 500 А) и УПС 901У3 (токи до 800 А).

Некоторые особенности имеет гелиево-дуговая сварка вольфрамовым электродом на постоянном токе прямой полярности. Сварка на постоянном токе прямой полярности представляет значительный интерес с точки зрения увеличения проплавляющей способности дуги и возможности форсирования режимов сварки. При этом требуется обеспечить достаточную для получения качественного соединения очистку металла шва от окислов. Применение гелия и его смеси с аргоном обеспечивает хорошую защиту металла шва.

По теплофизическим свойствам гелий существенно отличается от аргона. Он имеет высокий потенциал ионизации и в 10...15 раз большую теплопроводность при температурах плазмы. Кроме того, он легче аргона примерно в 10 раз. Достаточная для дуги ионизация аргона наступает примерно при 16000 К, в то время как для гелия при 25000 К. Все эти особенности существенно влияют на свойства W-дуги в гелии. Например, добавление к аргону гелия превращает постепенно конусную дугу в сферическую. Пинчэффект в гелиевой плазме практически не имеет места до весьма больших плотностей тока, так как значительная теплопроводность гелия дает низкий температурный градиент по радиусу столба и весьма высокое внутреннее давление. Высокий средний градиент напряжения в плазме гелия, достигающий $E = 2$ В/мм против $E = 0{,}8...1{,}2$ В/мм в аргоне, обуславливает высокое напряжение на дуге. При этом процесс разрушения окисной пленки зависит от длины дугового промежутка. Весьма малое расстояние между катодом и анодом дает возможность использовать для указанной цели энергию электронов, аналогично электроэрозионной обработке металлов. Кроме того, при сварке короткой дугой с частичным погружением её в соединяемый металл окисная пленка разрушается и под воздействием излучения [40]. При замене аргона гелием возрастает глубина проплавления. Сварку неплавящимся электродом легче всего осуществлять в гелии высокой чистоты (99,9%).

Сварные швы на алюминиевых сплавах, выполненные на постоянном токе прямой полярности в гелии без присадочной проволоки, имеют обычно ровную блестящую поверхность. При использовании присадочной проволоки поверхность тусклая, покрыта легко удаляемым серым налетом.

Особое место при сварке алюминиевых сплавов занимает сварка плавящимся электродом. Электрическая дуга горит между

изделием и плавящимся электродом, который подается в зону дуги обычно с постоянной скоростью. Плавящийся электрод применяют при сварке алюминиевых сплавов толщиной более 3 мм. Для более тонкого металла не удается добиться устойчивого горения дуги при мелкокапельном струйном переносе металла. Экономическая целесообразность применения сварки плавящимся электродом возрастает с увеличением толщины металла, глубокое проплавление которого обеспечивает процессу высокую производительность. Этим способом сварки удается получить надежное проплавление корня шва при сварке тавровых и нахлесточных соединений.

Сварку плавящимся электродом в защитных газах выполняют на постоянном токе обратной полярности, при которой обеспечивается разрушение окисной пленки на кромках за счет катодного распыления и нормальное формирование швов.

Преимущества процесса сварки плавящимся электродом: хорошее перемешивание ванны, меньшая вероятность получения в металле швов крупных окисных включений. Вместе с тем, при сварке в аргоне плавящимся электродом диаметром до 2,5 мм трудно избежать образования пор в металле шва.

При сварке плавящимся электродом важнейшим процессом, определяющим его стабильность и качество формирования шва, является процесс формирования капель на электроде и перенос их в ванну. Этим требованиям отвечает способ импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом. Силу и длительность импульсов сварочного тока выбирают такими, чтобы можно было обеспечить управляемый перенос металла с торца электрода небольшими каплями в широком диапазоне токов. Импульсно-дуговая сварка позволяет выполнять сварку в различных пространственных положениях (вертикальном, горизонтальном и потолочном). Импульсное воздействие дуги на ванну должно способствовать лучшему дроблению окисных пленок и более полному протеканию реакций взаимодействия поверхностной влаги, имеющейся на электродной проволоке, с металлом на стадии формирования капли. Это способствует сокращению пористости в металле швов и предупреждению дефектов, вызванных залеганием окисных пленок, т.е. обеспечивается повышение механических свойств наплавленного металла и сварных соединений в целом, улучшается стабильность процесса. Импульсно-дуговая сварка позволяет использовать проволоку диаметром 0,8...1 мм и получать соединения металла минимальной толщины 1...3 мм, существенно стабилизировать провар корня шва.

Большинство дефектов литой структуры сварных швов возникает на этапе кристаллизации, поэтому управление качеством сварных швов должно осуществляться прежде всего на этой стадии образования сварного соединения.

Эффективным средством управления процессом кристаллизации металла шва и измельчением первичной структуры является электромагнитное перемешивание (ЭМП) сварочной ванны. Воздействие ЭМП на кристаллизацию предполагает создание в расплаве сварочной ванны объемных пондеромоторных сил в результате воздействия тока, протекающего в ванне с внешним магнитным полем и управления гидродинамическими проявлениями этих сил. Это достигается наложением на сварочную ванну внешнего продольного магнитного поля, реверсируемого относительно сварочного тока. Схема взаимодействия внешнего аксиального магнитного поля B со сварочным током $I_{св}$ при ЭМП жидкого металла сварочной ванны приведена на рис.2.70. Под действием пондеромоторных сил расплав приходит в движение в направлении, определяемом сочетанием полярности внешнего магнитного поля и сварочного тока. На рис.2.70 указаны траектории движения частиц расплава под действием электромагнитных сил F. Основу этого движения составляет плоскопараллельное вращение частиц вокруг нормали к зеркалу ванны, проходящей через центр активного пятна дуги на поверхности расплава. Действительные траектории движения частиц отличаются от круговых в связи с влиянием на картину течений объемно-криволинейной поверхности ванны и особенностей распределения сварочного тока в расплаве. Реверсирование с определенной частотой внешнего магнитного поля тока относительно сварочного тока в расплаве приводит к перемене с той же частотой направления массовых пондеромоторных сил, что делает возможным управление распределением теплоты и концентрацией примесей у фронта кристаллизации.

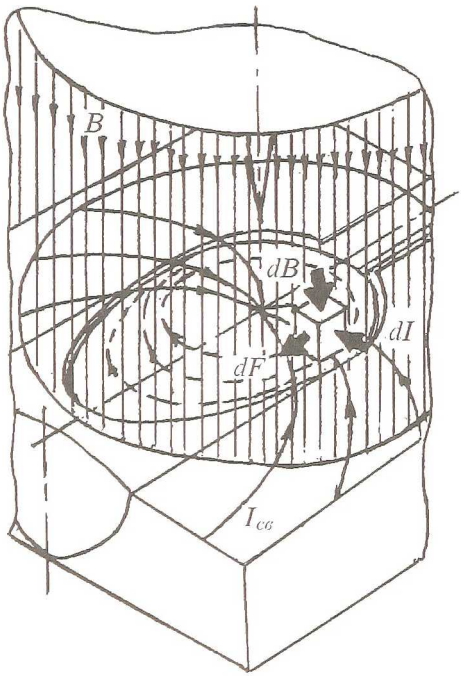


Рис.2.70. Схема взаимодействия внешнего аксиального поля B со сварочный током $I_{св}$ при ЭМП

Сварочная дуга прямой полярности в аксиальном магнитном поле является особой формой дугового разряда, у которого анодное пятно имеет форму кольца, а столб дуги конуса. Вращение в аксиальном магнитном

поле дуги обратной полярности сопровождается появлением новых катодных пятен, которые перемещаются скачками в направлении вращения дуги по траектории, близкой к круговой. В этом же направлении перемещается и анодное пятно по боковой поверхности электрода.

В общих случаях вращение дуги в магнитном поле сопровождается некоторым ростом напряжения (при снижении сварочного тока), рассредоточением пятна нагрева на изделии и может быть причиной нежелательного уменьшения глубины проплавления. Для снижения возмущений дуги и стабилизации на этой основе глубины проплава были рекомендованы для ЭМП прерывистые поля, создаваемые прохождением по соленоиду дискретных импульсов.

Увеличение скважности импульсов приводит к более длительному протеканию сварочного процесса в обычных условиях, т.е. при отсутствии магнитного поля. С приходом каждого импульса УМП управляющего магнитного поля дуга начинает вращаться, в результате чего рассредотачивается пятно нагрева на изделии и снижается глубина провара. Создаваемые одновременно в ванне электромагнитные силы обеспечивают необходимые условия перемешивания расплава. Во время паузы между последовательными импульсами УМП восстанавливается естественная форма сварочной дуги с максимальной концентрацией теплоты и давления в области локального активного пятна на изделии. Электромагнитного перемешивания в этот период не происходит, глубина проплавления увеличивается.

При отсутствии макродефектов причиной негерметичности являются газовые микронеплотности, наличие и величина которых зависит от скорости кристаллизации. Регулирование процесса кристаллизации возможно путем прерывистой подачи присадочной проволоки в сварочную ванну. Периодическая подача в сварочную ванну холодного металла обеспечивает термический цикл с принудительной прерывистой послойной кристаллизацией. В паузы между подачей присадочной проволоки наблюдается катодное распыление оксидных пленок, исключается натек расплавленного металла на холодную основу. Волнообразные перемещения жидкого металла в этом процессе сварки способствуют его дегазации. Технология сварки внедрена в производство, для чего в отрасли разработана и изготовлена специальная приставка прерывистой подачи присадочной проволоки.

В целях выявления сравнительной эффективности процесса сварки с УМП по приведенной методике дополнительно испытывались швы, выполненные обычной аргонодуговой сваркой и с импульсной подачей присадочной проволоки. Результаты испытаний приведены на рис.2.71, где количество (I) и интенсивность (II) негерметичностей представлены для следующих видов сварки: а - обычной аргонодуговой; б импульсной подачей присадочной проволоки; в - с УМП.

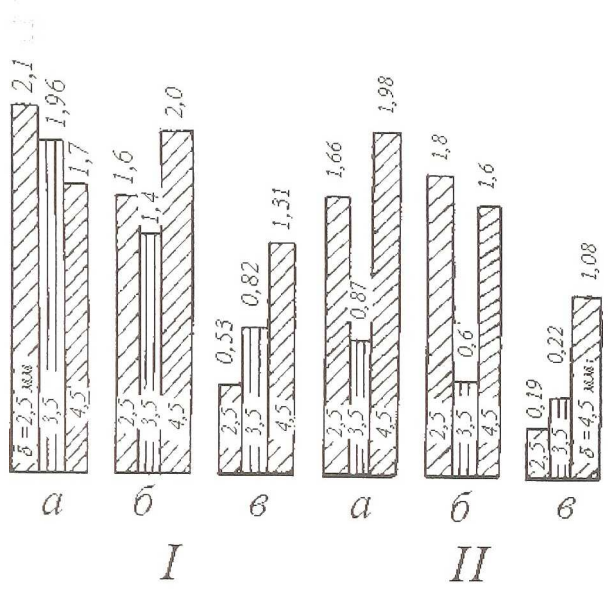


Рис.2.71. Диаграмма количества и интенсивности течей для различных видов сварки

Полученные данные подтвердили высокую эффективность применения УМП при сварке. Герметичность швов при обычной аргонодуговой и сварке с импульсной подачей присадочной проволоки для толщин 2,5 мм увеличивается соответственно в 4 и 3 раза; для толщины 3,5 мм - в 2,4 и 1,7 раза; для толщины 4,5 мм - в 1,3 и 1,5 раза соответственно.

Разработка схем технологических процессов сборки-сварки герметичных корпусов производится с учетом принятой схемы членения и обеспечения уровня качества сварных соединений. Выбранный способ сварки, оборудование, технологическая оснастка, порядок операций в технологическом процессе должны обеспечивать высокие технические характеристики сварных конструкций (прочность, герметичность, точность геометрической формы, надежность и др.), а также хорошие экономические показатели (трудоемкость и др.).

Технологическая схема сборки-сварки герметичного корпуса СА космического корабля "Союз" представлена на рис.2.72 [71]. Она обеспечивает возможность параллельного изготовления верхней и нижней частей колоколообразного корпуса, но далее все сборочно-сварочные операции могут выполняться только последовательно, что предопределяется особенностями конструкции корпуса. Наряду с прямолинейными, кольцевыми и круговыми швами здесь выполняется и сварка по сложным пространственным швам.

Перед началом технологической операции сборки-сварки проверяют соответствие собираемых деталей требованиям конструкторской и технологической документации, отсутствие механических повреждений, загрязнений, следов коррозии и т.д. При контроле сбо-

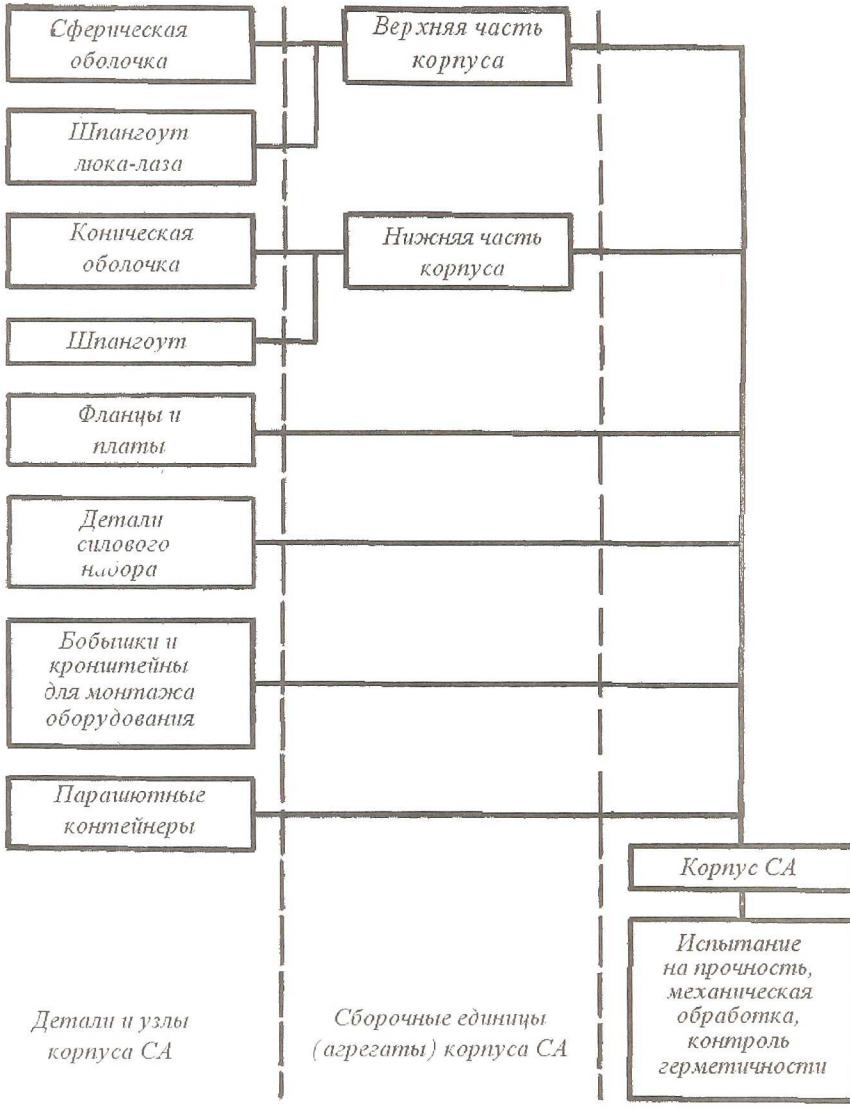


Рис.2.72. Технологическая схема сборки-сварки герметичного корпуса СА космического корабля "Союз"

рочно-сварочных приспособлений проверяют сроки их аттестации, исправность зажимных устройств, состояние базирующих и установочных приспособлений. Качество сборки деталей под сварку проверяют визуальным осмотром и измерением зазоров в стыках, смещения кромок и рисок плоскостей стабилизации, ширины нахлестки деталей, а также местных зазоров в стыках.

Для стыковых швов, выполняемых аргонодуговой сваркой, при толщине свариваемых кромок $S \leq 5$ мм смещение их по всей длине шва не должно превышать 0,20 S (но не более 0,5 мм), а местное - 0,25S (но не более 1 мм). При $S \geq 10$ мм допустимое общее смещение кромок не должно превышать 0,10 S (но не более 1 мм), а местное 0,15 S. Суммарная протяженность участков с местным смещением кромок не должна быть больше 20% от длины шва. Качество подготовки свариваемых поверхностей оценивают сравнением с эталонами и измерением высоты микронеровностей. Здесь же контролируют размеры сборочных единиц, оговоренные в конструкторской и технологической документации.

Контрольные операции охватывают каждый из изготовляемых корпусов и выполняют их по многоступенчатой схеме. Прежде всего результаты выполнения каждого перехода технологического процесса контролируют исполнитель и мастер, а отдельные контрольные операции выполняют еще и работники ОТК.

Для изготовления отдельных сборочных единиц герметичных корпусов используются специальные стенды и технологическая оснастка. Например, установка для сварки меридиональных швов сферических оболочек (рис.2.73), двухопорная установка для сварки кольцевых швов (рис.2.74).

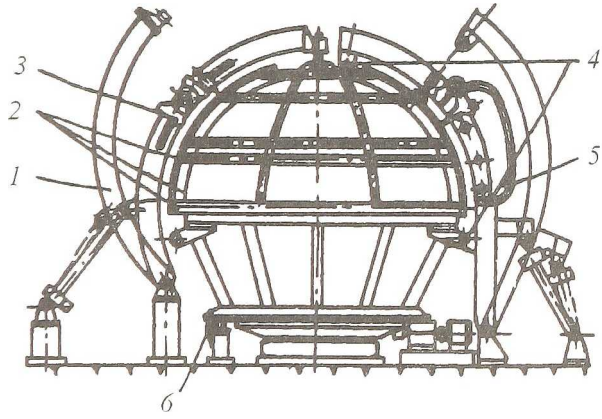


Рис.2.73. Схема установки для сварки меридиональных швов:
1 - направляющие для фрезерной головки; 2 - сферический каркас; 3 фрезерная головка; 4 фиксирующие замки; 5 сварочный автомат; 6 устройство для фиксирования угла головки

Детали сборочных единиц на сборку поступают обычно с технологическими припусками на обработку. Подрезку свариваемых деталей оболочки производят на токарных станках или с помощью фрезерных головок.

После сборки свариваемых деталей в специальных стендах необходимо обеспечить надежное прижатие свариваемых кромок к

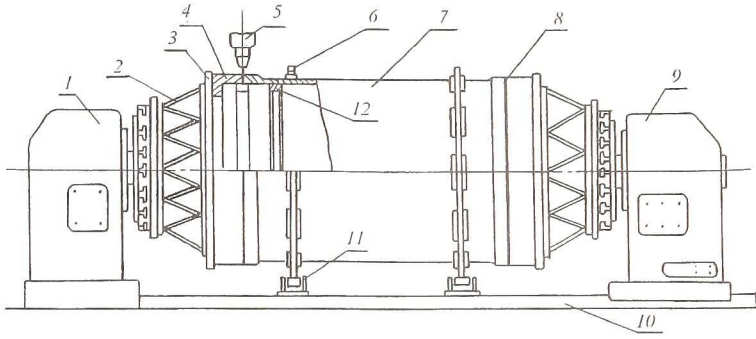


Рис.2.74. Схема двухопорной установки для сварки колец:
1 - неподвижная бабка стапеля; 2 - корзина; 3 - переходное кольцо; 4 - торцевой шпангоут; 5 сварочная горелка; 6 бандаж; 7 обечайка; 8 сварной шов; 9 неподвижная бабка; 10 - направляющие; 11 - катки; 12 - разжимное кольцо

подкладным кольцам. Для обеспечения прижатия широко используют гидроприжимы клавишного типа.

Для качественного исполнения кольцевых швов широко используются разжимные кольца (рис.2.75) [71]. Разжимное кольцо состоит из четырех-шести секторов, на которых закреплены резьбовые тяги, соединенные тандером, резьбовая поверхность которого имеет два участка с разнонаправленной резьбой.

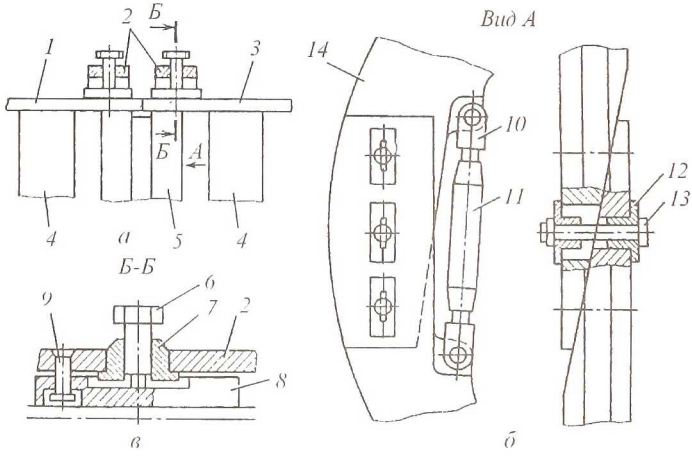


Рис.2.75. Схема взаимной ориентации деталей при сварке кольцевых швов:
а схема расположения разжимного, калибровочного и бандажного колец; б конструкция разжимного кольца; в - схема фиксации кромок свариваемых деталей; 1,3 - свариваемые детали; 2 - бандажные кольца; 4 - калибровочные кольца; 5 - разжимное кольцо; 6 - нажимной винт; 7 - втулка; 8 - клавишный прижим; 9 - винт; 10 - резьбовые тяги; 11 - тандер; 12 - втулка; 13 - стяжной болт; 14 - секторы разжимного кольца

Поэтому при вращении тандера соседние секторы поворачиваются, скользя по наклонной плоскости, благодаря чему изменяется диаметр кольца, а степень этого изменения отсчитывается по нониусу. При этом направление поворота секторов определяется направлением вращения тандера. В осевом направлении секторы фиксируются с помощью втулок и болта, причем одна из втулок перемещается в окружном направлении в радиальном пазу сектора. Сочленение секторов по наклонной плоскости позволяет улучшить условия удержания ванны расплавленного металла.

Во многих случаях для сборки-сварки отдельных сборочных единиц используют специальную технологическую оснастку, в которой осуществляют сборку свариваемых деталей, затем устанавливают на манипулятор сварочной установки для последующей сварки. Пример такой оснастки для сборки-сварки конической обечайки, а также для сварки конической и сферической обечаек спускаемого аппарата "Союз" приведен на рис.2.76 [71].

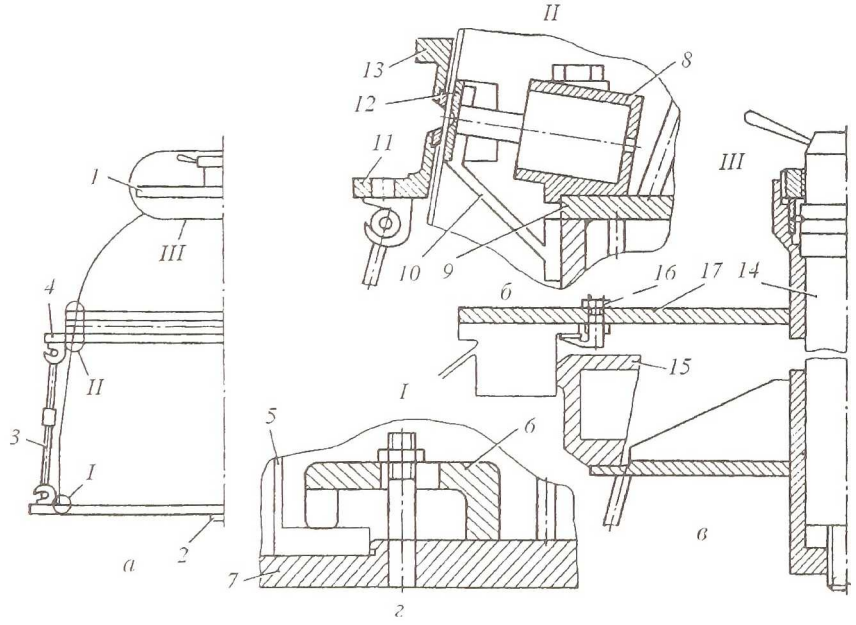


Рис.2.76. Схема приспособления для сборки-сварки сферической и конической оболочек корпуса СА:

а - общая компоновка приспособления; б - схема прижима свариваемых кромок; в - схема крепления верхней и нижней частей приспособления; г схема установки и крепления конической оболочки; 1,4 верхняя и нижняя части приспособления соответственно; 2 центрирующая шайба; 3 резьбовые стяжки; 5 коническая оболочка; 6,16 прижимы; 7 и 17 верхнее и нижнее основания соответственно; 8 гидроцилиндры; 9,10 кронштейны; 11,13 нижнее и верхнее бандажные кольца соответственно; 12 - сектор гибкого подкладного кольца; 14 - центральный болт; 15 - центрирующая шайба

Сборка-сварка фланцев и оболочки корпуса выполняются как по круговым стыкам, так и по стыкам произвольной формы. Для автоматической сварки стыков произвольной формы используют специальные установки с числовым программным управлением (ЧПУ), обеспечивающие управление движением сварочной головки вдоль стыка и расстоянием между электродом и свариваемыми поверхностями. Погрешности взаимного расположения деталей компенсируют за счет локальной выколотки оболочки с целью создания в ней пластических деформаций обратного знака по отношению к сварочным, правки деталей и механической обработки фланцев после сварки.

Для разметки осей отверстий и сварки фланцев и плат герморазъемов по круговым стыкам используют приспособление, схема которого показана на рис.2.77 [71]. Приспособление состоит из основания *2*, в центральной втулке которого установлена колонна *16* с поворотным кронштейном *13*. Вокруг оси основания *2* с помощью ручного привода *1* может вращаться кронштейн *3*, угловое положение которого определяется с помощью угловой шкалы, нанесенной на основании. На кронштейнах *3* и *13* закреплен кронштейн *12*, обводы которого эквидистантны образующей корпуса *8*, устанавливаемого на основании *4*. Корпус *8* фиксируется в угловом направлении путем совмещения рисок одноименных плоскостей стабилизации, нанесенных на основании *4* и шпангоуте корпуса. Вдоль кронштейна *12* перемещается опора *5*, в которой располагается керн *6*; опора *5* фиксируется по отверстиям в кронштейне *3*. Вдоль колонны *16* перемещается горизонтальная площадка *15*, положение которой определяется фиксатором *7*. На площадке *15* установлена втулка *14*, к которой крепится угловая направляющая *11*, а в радиальном отверстии во втулке зафиксирована поворотная консоль *10*, которая скользит в окружном пазу направляющей *11*. Втулка *14* может поворачиваться вокруг колонны *16* на 360°. Длина консоли *10* регулируемая, а на конце консоли имеется центрирующий болт *18* и направляющий штырь *17*, с помощью которого крепится керн *9*.

Таким образом, вращая кронштейн *3* и консоль *10* вокруг колонны *16*, перемещая опору *5* вдоль кронштейна *12*, а площадку *15* вдоль колонны и поворачивая консоль *10* в вертикальной плоскости с помощью керна, на внутренней и внешней поверхностях корпуса можно разметить любую точку.

Разметку и разделку отверстий производят двумя способами. В первом случае керном размечают в оболочке корпуса центр отверстия, после чего отверстие размечают с помощью штангенциркуля, а само отверстие растачивают на расточном станке. Чаще пользуются другим способом. На опору *5* устанавливают свариваемый фланец, и после его совмещения с оболочкой растачивают отверстие меньшего

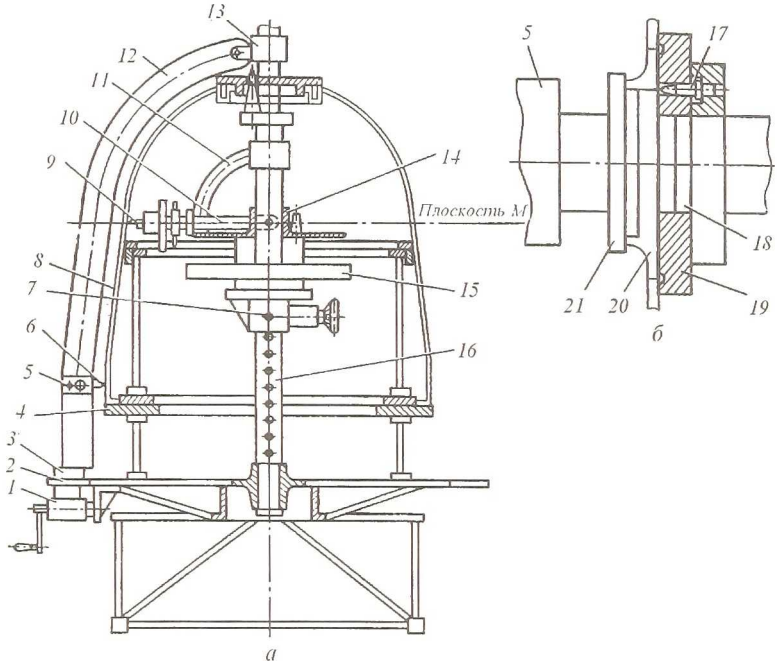


Рис.2.77. Схема приспособления для разметки осей фланцев и сварки фланцев с корпусом СА:
а - общая компоновка приспособления; б - схема установки фланца

диаметра, производят выколотку оболочки на высоту 4...6 мм (ширина зоны выколотки 40...60 мм от торца отверстия). Далее окончательно припиливают отверстие по кромкам ввариваемого фланца.

Ручная сварка фланцев *20* с оболочкой производится в этом же приспособлении, для чего на консоль *10* устанавливается подкладное кольцо *19*, а на опору *5* прижим *21*.

Сварку деталей силового набора с оболочкой корпуса осуществляют в следующей последовательности. На оболочке корпуса в соответствии с требованиями чертежа размечаются места расположения силового набора, и затем деталь силового набора припиливается в месте её стыка (допустимый зазор не более 0,5 мм). К деталям силового набора приваривается фольга из рентгеноконтрастного материала, после чего производится прихватка силового набора к оболочке точечной аргонодуговой сваркой. После разметки на деталях силового набора мест расположения точек производят сварку образцов-свидетелей и приступают к сварке деталей силового набора и оболочки. Точечную электроконтактную сварку производят на установке, состоящей из сварочной машины и гидравлического манипулятора, обеспечивающего необходимое для сварки число степеней свободы. Корпус устанавливают на манипулятор, а управление сварочным

циклом и перемещением изделия производит оператор с пульта, оборудованного телевизионным монитором для дистанционного наблюдения за производственным процессом. Перед постановкой точек, расположенных на расстоянии 25 мм от прихватки, последнюю срубают. Стыки деталей силового набора сваривают ручной аргонодуговой сваркой.

Бобышки и кронштейны для монтажа оборудования приваривают к оболочке корпуса следующим образом. С использованием сборочных приспособлений размечают на оболочке положение бобышек и кронштейнов, после чего выполняют аргонодуговую сварку (в отдельных случаях точечную). Механически обрабатывают торцы стыковочных шпангоутов, поверхности фланцев и плат, различные полости и карманы на торцевых шпангоутах, отверстия в бобышках и кронштейнах. Перед механической обработкой проверяют правильность расположения фланцев, плат, кронштейнов и оценивают достаточность припуска для качественной обработки. При необходимости производят правку конструкции.

2.9. Сборка-сварка баков-емкостей летательных аппаратов

В зависимости от назначения конструкции баков многообразны. Выбор формы бака диктуется в основном необходимостью создания ЛА с наиболее плотной компоновкой (рис.2.78). Кроме того, приходится учитывать достоинства и недостатки каждой формы.

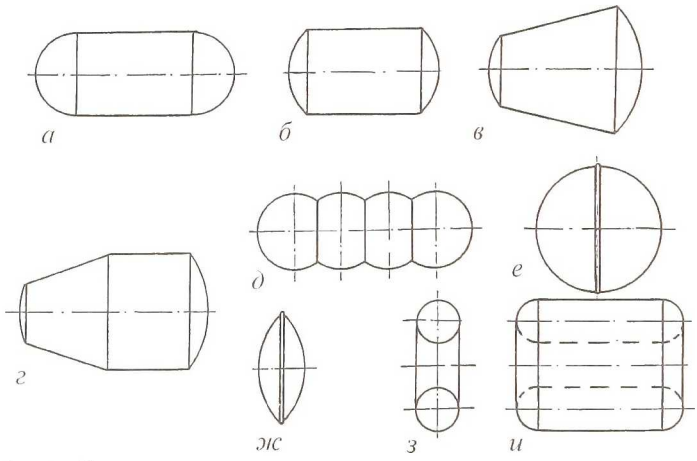


Рис.2.78. Формы баков:
а, б -цилиндрические; в конусные; г сложной формы; д ячеистый бак; е сферический; ж - чечевицеобразный; з - торовый; и - кольцевой

По функциям, выполняемым в конструкции аппаратов, баки могут быть несущими, когда они являются корпусом аппарата, формирующим его обводы и воспринимающим нагрузки, приходящиеся на корпус аппарата, и подвесными, когда они помещаются внутри несущего корпуса аппарата. В КА последние значительно распространены. По конструкции стенок баки могут быть с гладкими листовыми стенками без силового набора или с силовым набором сборной конструкции, со стенками из монолитных, например, вафельных, или только с продольным набором панелей. Требования к материалам баков и емкостей, особенно для КА, весьма высоки и иногда даже противоречивы. Они должны обладать высокой прочностью и жесткостью, удельной прочностью, противостоять как высоким, так и криогенным температурам, должны быть коррозионно-стойкими по отношению к компонентам топлива, иметь высокую плотность (непроницаемость) для обеспечения герметичности по стенкам, что особенно важно для емкостей, работающих в глубоком вакууме. В то же время они должны обладать приемлемыми технологическими свойствами: пластичностью (штампуемостью), свариваемостью, хорошей обрабатываемостью резанием и т.д. Наиболее распространенными материалами для баков и емкостей являются деформируемые сплавы (АМг3М, АМг6, АМг6М, Д16АМ, Д20, АК-6, АК-8, В95АМ, 1201 и д.т.), коррозионно-стойкие и высокопрочные стали (30ХГСНА, 12Х18Н9Т, 20Х1364Г9, 12Х18Н10Т, 15Х18Н12С4ТЮ, ВНС-2 и др.), титановые (ОТ-4, ОТ4-1, ВТ-6, ВТ-14 и др.), иногда магниевые сплавы (МА1-М, МА8-М) и др. В последнее время для емкостей высокого давления начинают находить применение никелевые (ХН6ОВТ, ХН77ТЮР), молибденовые и бериллиевые сплавы.

Общими требованиями к бакам и емкостям являются: высокая прочность и жесткость, особенно для несущих баков и емкостей высокого давления, вибропрочность и сохранение эксплуатационных качеств при циклических нагрузках; минимальная масса; герметичность не только по швам, но и самих материалов (герметичность по стенкам); стойкость против агрессивного воздействия компонентов; сохранение эксплуатационных качеств в широком диапазоне температур, иногда при циклическом температурном воздействии; простота и технологичность конструкции; обеспечение требуемой точности изготовления, назначенного ресурса; на внешних и внутренних поверхностях баков не допускаются повреждения, царапины, заусенцы, острые кромки, внутренние полости должны быть чистыми от стружки, металлических частиц и пыли, остатков обработки, что может нарушить работу клапанов, форсунок и т.п. Все эти и другие требования должны обеспечиваться как самой конструкцией баков и емкостей, так и соответствующей технологией и принятой системой контроля и испытаний.

Общая схема изготовления баков и емкостей состоит из этапа изготовления деталей и этапа сборки [69]. Характерные детали типовых конструкций баков и емкостей можно разделить по назначению на две группы. К первой группе относятся детали, входящие в силовую схему (корпус) бака: обечайки, шпангоуты, стыковочные кольца, стрингеры, днища, соединительные юбки, детали подвески баков. Ко второй группе относятся детали арматуры, обеспечивающие заправку бака или емкости и надежную подачу компонента: детали заборных устройств, датчиков уровней жидкости, клапанов; кронштейны, фланцы, заборники, штуцера, патрубки и т.д.

Днища являются наиболее специфичными и характерными деталями почти всех типов баков и корпусов. По форме обводов днища могут быть плоскими, сферическими, эллиптическими, параболическими, куполообразными и полуторовыми с бортами различной формы и без бортов. Большинство днищ имеет отверстия с отбортовками для приварки деталей арматуры.

По диаметру различают малогабаритные (до 300 мм), среднегабаритные (300...1000 мм) и крупногабаритные (более 1000 мм) днища. По составу исходных заготовок различают простые цельноформованные (цельноштампованные) и сложные штампосварные конструкции днищ, сварные из отдельных сегментов (лепестков), число которых для крупных днищ доходит до 15...20 (рис.2.79).

Схема типового технологического процесса изготовления днищ представлена на рис.2.80.

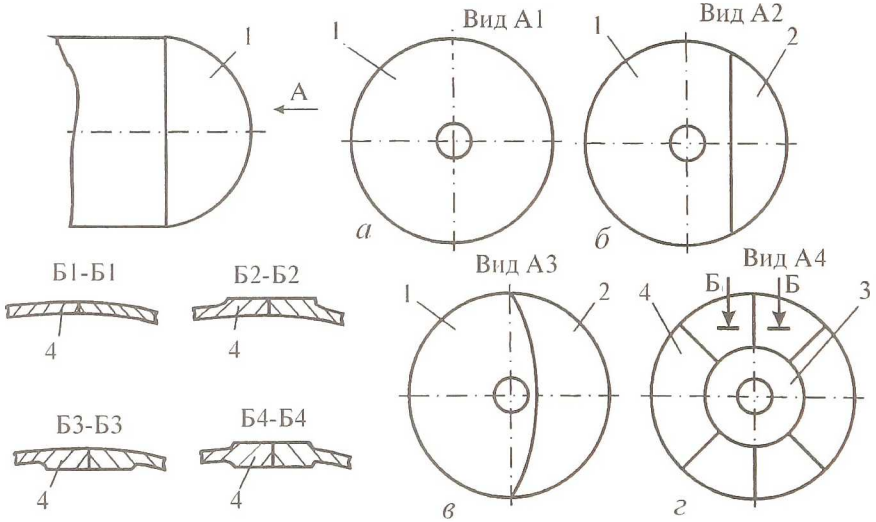


Рис.2.79. Днища баков:
1 - днище; 2 - часть днища; 3 - полюсная часть; 4 - лепесток; Б1-Б1, Б2-Б2, Б3-Б3, Б4-Б4 - варианты сварных соединений

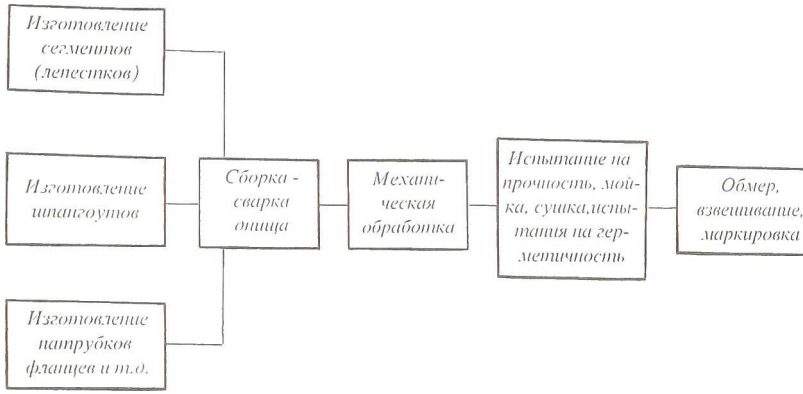


Рис.2.80. Схема типового технологического процесса изготовления днищ

Оболочки днища баков целесообразно изготавливать из одного листа (рис.2.79, а). При отсутствии листов с необходимыми габаритными размерами их приходится делать составными (рис.2.79, б,в,г).

Стыковочные и промежуточные шпангоуты корпусов баков предназначаются для стыковки обечаек с днищами и с соединительными юбками. Они могут изготавливаться либо из катаных листов, либо из прессованных профилей на специальных профилегибочных станках. Шпангоуты значительных диаметров (более 1500 мм) обычно изготовляют из сегментов с последующей сваркой, отжигом и калибровкой. Промежуточные шпангоуты обычно подаются на сборку обечаек, а стыковочные - на общую сборку баков.

Сварка сегментов днищ между собой и со шпангоутами, приварка патрубков и фланцев производится автоматической дуговой сваркой в среде защитных газов (аргоне, реже в гелии). Сварные швы должны иметь прочность не менее 0,9 от прочности основного материала.

Входной контроль включает в себя проверку комплектации узлов и их сопроводительной документации, внешний осмотр с целью обнаружения внешних повреждений, контроль геометрических размеров узлов в соответствии с техническими требованиями. Подготовка узлов из алюминиевых сплавов включает в себя химическую обработку (травление, промывка, сушка) с целью удаления с поверхности узлов загрязнений и достаточно толстых окисных пленок. Непосредственно перед сваркой свариваемые кромки узлов зачищают механическим способом (металлической щеткой, шабером, фрезой) на ширине не менее 20 мм от торца или края разделки. В отдельных случаях для удаления окисных пленок используются флюсы на основе хлористых солей калия и бария в виде суспензий, которые наносятся на свариваемые кромки.

Шпангоут и оболочку днища собирают в специальном приспособлении с учетом специальных меток плоскостей стабилизации на шпангоуте и приспособлении. Оболочку днища закрепляют относительно шпангоута с помощью прижимной "корзины" и кольца. В приспособлении свариваемые кромки узлов прижимаются к специальной подкладке, имеющей канавку определенных размеров. Правильное формирование корня шва и получение хорошей структуры шва и околошовной зоны определяется в основном теплофизическими свойствами материала и условиями теплоотвода, который можно регулировать с помощью подкладок. Затем проводится проверка смещения кромок относительно середины канавки подкладки и зазора между свариваемыми кромками. Стыки в некоторых случаях прихватываются ручной сваркой. После прихватки контролируется правильность сборки.

Сварка днища производится на специализированных стендах (рис.2.81). В состав стенда входит установка для автоматической аргонодуговой сварки и манипулятор. На манипуляторе устанавливается технологическая оснастка со свариваемыми узлами [31].

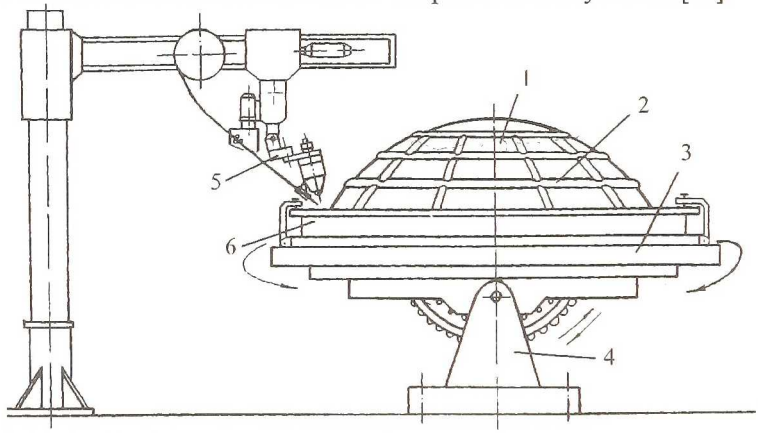


Рис.2.81. Схема установки для сварки полусферы со шпангоутом:
1 - днище; 2 - приспособление; 3 - стол манипулятора; 4 - манипулятор; 5 - сварочный автомат; 6 - шпангоут днища

Подготовку к сварке начинают с выставления сварочной горелки относительно стыка и установки параметров сварки согласно операционной карте. Путем прогона горелки вдоль всей длины сварного стыка определяется правильность выставления электрода. Сварка может производиться за один или несколько ходов. Присадочная проволока также проходит предварительную химическую обработку (электрополировку) для удаления окисных пленок.

Параметры режима сварки назначают в зависимости от свойств и толщины свариваемого материала, конструкции сварного соединения. В качестве примера приведены режимы аргонодуговой

сварки полусфер со стенками толщиной 12 мм на постоянном токе обратной полярности электродом диаметром 8...10 мм:
сила тока на первом электроде 400...440 А, на втором - 400...440 А, на третьем - 640...660 А; скорость сварки - 8...14 м/ч; скорость подачи присадочной проволоки - 70...90 м/ч; расход аргона - 18...20 л/мин.

Качество сварных швов контролируется визуально. После зачистки сварных швов проводят рентгеноконтроль. Механическая обработка шпангоута днища проводится на токарно-карусельных и фрезерных станках с целью обеспечения последующей стыковки узлов. Отверстия для фланцев и патрубков вырезают и растачивают согласно карте эскизов для каждого днища. Вырезку отверстий проводят вручную (резаком) при толщине оболочки не более 2...3 мм, или на расточных станках при большей толщине стенки.

Установку фланцев и патрубков на днище производят на координационной плите по эскизу разметки (рис.2.82). На координационную плиту вначале выставляют приспособления для сборки днища с патрубками и фланцами согласно схеме расположения стоек [71]. После подгонки, прихватки и контроля сборки патрубков и фланцев производится приварка их к днищу на специальных установках (рис.2.83).

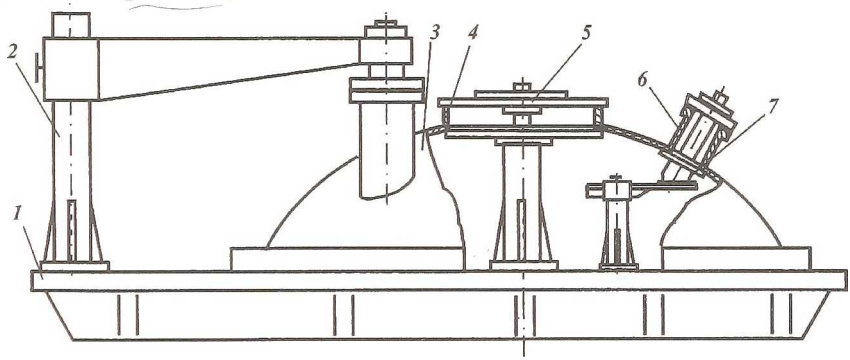


Рис.2.82. Схема установки фланцев и патрубков на днище на координатной плите:
1 - координатная плита; 2 - стойка приспособления; 3 - днище; 4 - фланец; 5 - приспособление для установки фланца; 6 патрубок; 7 приспособление для установки патрубка

Затем после разметки и установки арматуры (кронштейнов и др.) выполняют прихватку, после чего проводится контроль сборки и приварка ручной аргонодуговой сваркой. Контроль качества сварки осуществляется путем испытаний на прочность (гидро- или пневмоиспытания) и герметичность. Испытания проводятся в помещении цеха на участке испытаний, который должен быть оборудован защитными броневыми щитами, камерами, боксами и другими средствами безопасности. Испытания проводятся на специальных стендах. Рабочее давление выдерживается $P_{ис} = (1,15...1,25)P_{раб}$, где $P_{раб}$ - максимальное рабочее давление в емкости.

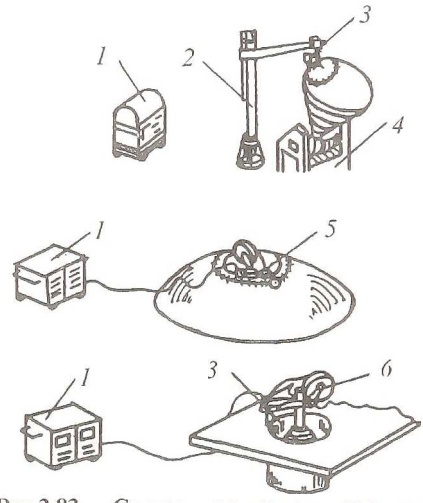


Рис.2.83. Схемы установок для вварки фланцев и патрубков:

1 - источник сварочного тока; 2 - колонна с консолью; 3 головка сварочная; 4 манипулятор; 5 автомат сварочный; 6 механизм вращения

Испытательное давление выдерживается в течение 0...15 мин. Контроль осуществляется по манометру, спад давления не допускается.

Испытания на герметичность проводят в вакуумных камерах или негерметичных камерах методом натекания при атмосферном давлении. Рабочим газом является гелий или гелиево-воздушная смесь. В качестве контрольного оборудования используют течеискатели типа ПТИ-7, ПТИ-10. При относительно невысоких требованиях к герметичности применяют метод дисперсных масс .

Обечайки являются одним из основных элементов цилиндрических, конических и сферических баков (рис.2.84). Обечайки изготовляются из листовых заготовок гибкой-прокаткой. После чего производится сварка полученного полуфабриката по продольному шву. Во многих случаях после формообразующих и сварочных операций вводят операцию химического фрезерования с целью облегчения обечаек и образования усиления по сварным швам. Это обеспечивает равнопрочность конструкции по стенкам и швам. На этапе предварительной сборки (если бак состоит из нескольких обечаек) в обечайки устанавливают поперечные силовые элементы (шпангоуты, перегородки, кронштейны и т.д.). Сборка производится в специальных стапелях вследствие малой жесткости обечаек. На рис.2.85 представлены компоновочные схемы стендов для сварки продольных (а) и кольцевых (б) швов цилиндрических и конических обечаек. После контроля швов и приварки всех арматурных деталей обечайка поступает на сборку бака.

Стыковочные юбки (обечайки) служат для стыковки баковых отсеков с другими. По конструкции они представляют собой цилиндрические (редко конические) короткие сборочные обечайки, подкрепленные стрингерами и заканчивающиеся стыковочными шпангоутами. Технология изготовления юбок аналогична технологии корпусных обечаек, добавляются лишь (вследствие конструктивных отличий) прорезка окон или лючков, выштамповка различных местных усложнений, сверление отверстий и клепка со стыковыми шпангоутами. После сборки юбки подаются на общую сборку баков.

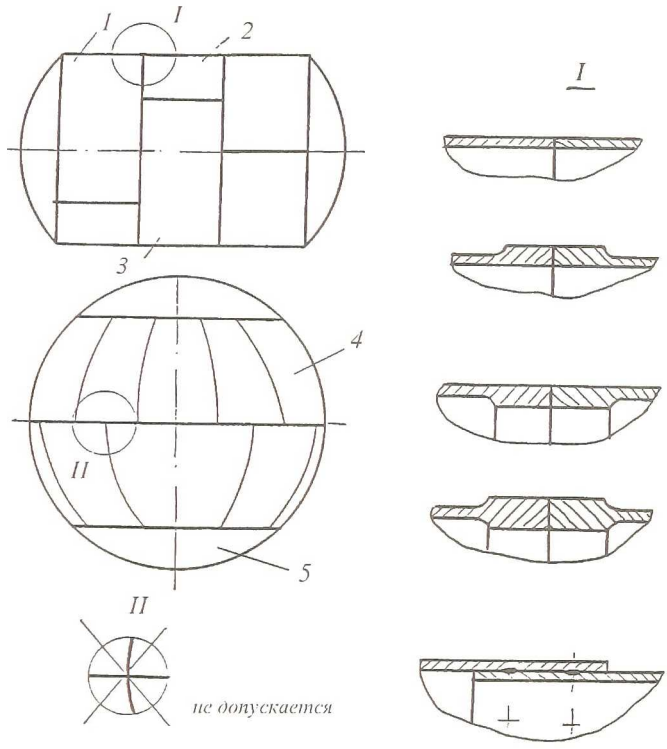


Рис.2.84. Обечайки баков:
1- кольцо; 2 и 3 - часть кольца; 4 - лепесток; 5 - полосная часть

Детали арматуры, установочные и соединительные детали, служащие для заправки и подачи компонентов, а также для соединения отдельных элементов силовой схемы и крепления различных коммуникаций, приборов и устройств (фланцы, штуцера, кронштейны, заборники, уголки, накладки, горловины, воронкогасители, патрубки и т.п.) относятся в большинстве случаев к жестким деталям общемашиностроительного типа. Они обычно изготавливаются из тех же материалов, что и основные элементы баков-конструкций. Ряд деталей этой группы изготавливают методами холодной штаповки из листовых, трубчатых и профильных заготовок; большинство же из них изготавливают механической обработкой.

После изготовления отдельных элементов и деталей баков и сборки некоторых сборочных единиц: обечаек, днищ, стыковочных юбок, стыковочных шпангоутов - они подаются на общую (агрегатную) сборку баков. С целью сокращения цикла изготовления и общей сборки все детали арматуры, установочные и соединительные детали должны по возможности собираться и привариваться к основным элементам баков на стадии узловой сборки.

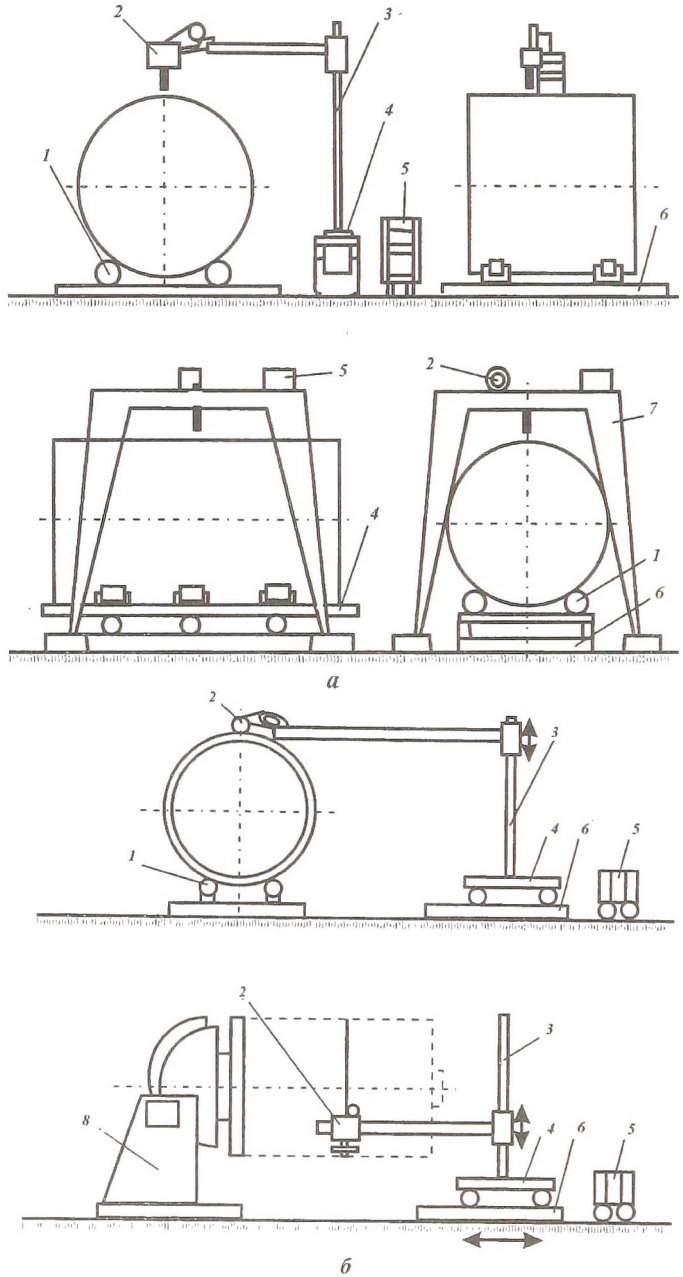


Рис.2.85. Компоновочные схемы стендов для сварки прямолинейных и кольцевых цилиндрических и конических обечаек:

1 - манипулятор роликовый; 2 - сварочный автомат; 3 - колонна с консолью; 4 - тележка; 5 - источник питания; 6 - направляющие; 7 - портал; 8 - манипулятор

В качестве примера рассмотрим сборку цилиндрических (конических) металлических баков. На рис.2.86 представлена схема сборки типовой конструкции цилиндрического (конического) бака. Как правило, общая сборка таких баков производится в специальных приспособлениях стапелях, предназначенных для точного базирования собираемых элементов относительно друг друга. Базами при установке в приспособление обечаек и днищ часто являются внутренние поверхности, что обеспечивает лучшую соосность при сборке. В ряде случаев в сборочном стапеле собираемые элементы после базирования только прихватываются в нескольких точках, что упрощает их конструкцию, а сварка производится в более простых поддерживающих приспособлениях, обеспечивающих вращение уже прихваченных элементов для осуществления кольцевой автоматической сварки в так называемых сварочных стендах. На рис.2.87 представлена конструктивная схема сварочного стенда.

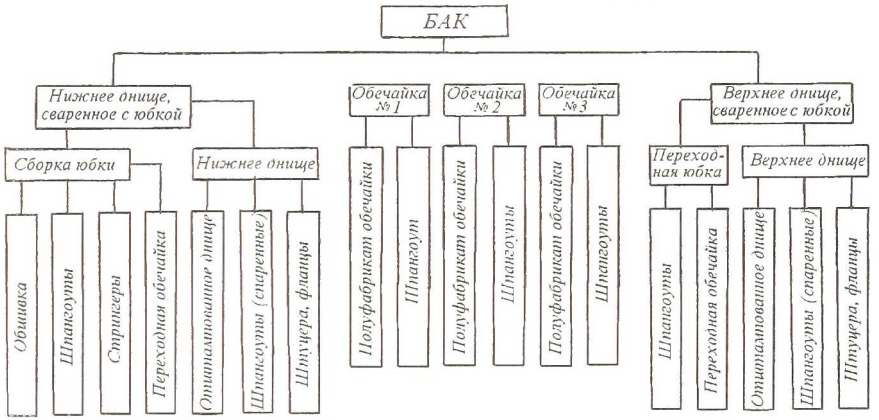


Рис.2.86. Схема сборки типовой конструкции топливного бака ЛА

Стенд для сварки похож на токарный станок. Он имеет переднюю и заднюю (подвижную) бабки *1, 7*, на план-шайбах *2* с помощью разжимных центрирующих устройств *3* (подвижных в радиальном направлении секторов) осуществлется закрепление свариваемых узлов. План-шайбы опираются на опорные ролики люнетов *8* для исключения нагрузки от их веса на валы. Два симметрично расположенных люнета *8* также исключают провисание свариваемого агрегата. Подкладное кольцо *5* служит для формирования проплава сварного шва, кольцо разъемное регулируемое для точной плотной установки в месте стыка собираемых обечаек. Подкладное кольцо точно фиксируется относительно зоны сварки за счет базирования по торцевым поверхностям разжимных колец *6*, предварительно установленных на свариваемые элементы бака и исключающих

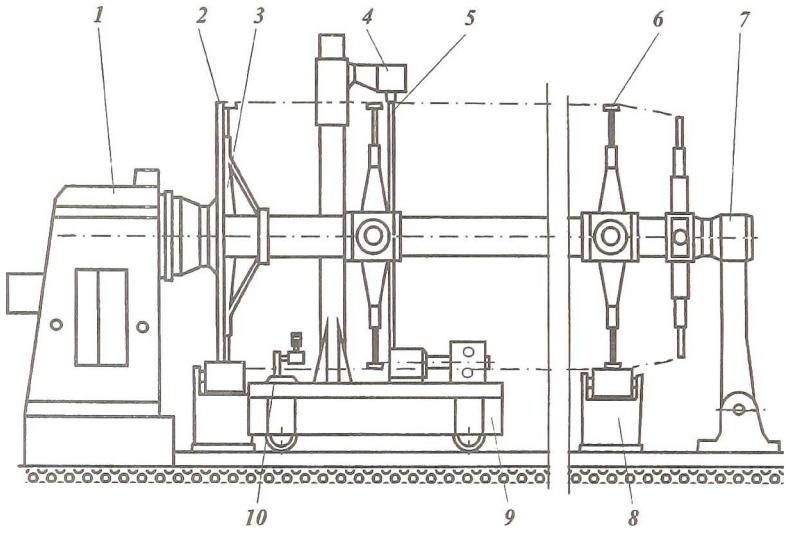


Рис.2.87. Схема сварочного стенда

овальность стыкуемых под сварку элементов (обечаек, днищ или юбок). После сварки последнего элемента бака сварочные приспособления (подкладные и разжимные кольца) выносятся через специально предусмотренный в днище бака технологический люк, поэтому приспособления должны быть разборными. Сварочный стенд имеет подвижный портал *9*, в верхней части которого закреплена головка для автоматической аргонодуговой электросварки *4*. В нижней части портала крепится фрезерная головка *10* для торцовки обечаек с целью точной подгонки стыкуемых элементов и для снятия лишнего металла по длине обечаек (припуска) с целью обеспечения размера бака.

После сварки бака производится зачистка проплавов сварных швов, контроль их качества, монтаж внутрибаковых устройств (тоннельных и дренажных труб, перегородок и т.п.), очистка внутренней полости от стружки, пыли и прочих загрязнений. Затем поступает на участок испытаний.

При изготовлении крупногабаритных баков в настоящее время находят применение термоупрочняемые алюминиевые сплавы, например, сплав 1201.

Свойства сварных соединений термически упрочненного сплава 1201 обычно находятся в прямой зависимости от степени концентрации тепловой энергии, что обуславливается способом сварки. Применяя различные способы сварки, можно влиять на структуру металла шва, протяженность зоны термического влияния и степень ее разупрочнения, а значит, получать сварные соединения с заданными механическими свойствами.

Сплав 1201 упрочняется закалкой и искусственным старением. При естественном старении прочность металла практически не изменяется. Максимальное упрочнение металла достигается в процессе старения закаленного твердого раствора при 433…453 К.

При воздействии температур сварочного процесса неблагоприятное изменение свойств материала происходит не только в шве, но и в зоне термического влияния.

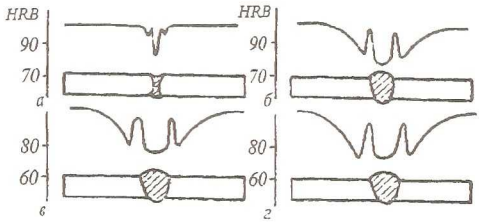


Рис.2.88. Изменение твердости металла зоны термического влияния при различных способах сварки плит толщиной 15 мм из термически упрочненного сплава 1201:

а - электронно-лучевая сварка; б - сварка в гелии; в - плазменная сварка; г - аргонодуговая сварка

Характер разупрочнения металла зоны термического влияния иллюстрирует рис.2.88, где даны кривые изменения твердости металла зоны термического влияния при различных способах сварки. Пики на кривых твердости соответствуют участкам околошовной зоны, где произошла частичная закалка во времени термического цикла сварки. Последующее искусственное старение соединений способствовало повышению твердости металла в этих участках по сравнению с более удаленными от шва зонами, в которых вследствие сварочного нагрева материал разупрочнился (произошел отжиг).

Общая ширина участка разупрочнения по обе стороны шва зависит от тепловложения и составляет: при сварке электронным лучом 15…20 мм, в среде гелия на постоянном токе 40…50 мм, при плазменно-дуговой сварке 60…65 мм и аргонодуговой 65…70 мм.

Сравнение потенциальных возможностей известных методов сварки показало, что для изготовления конструкций из термоупрочняемых сплавов наиболее перспективными являются методы гелиево-дуговой сварки на постоянном токе обратной полярности и электронно-лучевая сварка.

Наиболее нагруженными швами в цилиндрических емкостях являются продольные швы обечаек, выполняемые в вертикальном положении электронно-лучевой сваркой с горизонтальным лучом.

Вакуумирование зоны сварки осуществляется местной камерой, в которой электронная пушка (ЦЭП-4) перемещается в вертикальном направлении по всей длине стыка обечайки. Для обеспечения необходимой степени растяжения в рабочей зоне (0,01…0,5 Па) применяется стандартное вакуумное оборудование, обычно используемое в составе электронно-лучевых установок с камерами общего вакуумирования.

В целях предотвращения избыточных деформаций в процессе сварки и возникновения чрезмерных зазоров осуществляется сплошная прихватка стыка. В ИЭС им. Е.О.Патона разработан и осуществлен способ изготовления обечаек из сплава 1201 с механическими свойствами шва после старения на уровне свойств основного металла в термически упрочняемом состоянии [34].

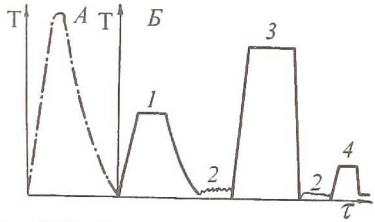


Рис.2.89. Примерная схема последовательности операций сварки и термомеханической обработки сварных обечаек:

А - термический цикл электронно-лучевой сварки; Б - термомеханическая обработка; 1 отжиг сварных заготовок; 2 - одно- и двухступенчатая деформация обечаек раскаткой; 3 нагрев и выдержка под закалку; 4 искусственное старение

Сварка продольного шва толстостенных обечаек осуществлялась стационарным электронным лучом мощностью 20,5...33,6 кВ при $V_{св}$= 20 м/ч вертикальными швами на подъем с полным проплавлением. Затем осуществлялась термомеханическая обработка цилиндрических заготовок по схеме: отжиг, деформация, закалка, деформация, искусственное старение. Примерная схема последовательности операций сварки и термомеханической обработки сварных обечаек приведена на рис.2.89.

При этом достаточно осуществить с определенной степенью окончательную деформацию, чтобы обеспечить механические свойства шва после старения на уровне свойств основного металла в термически упрочненном состоянии. Как показывают испытания, равнопрочность обеспечивается и в условиях криогенных температур [34].

Обечайки крупногабаритных баков изготавливают из монолитных и слоистых панелей из сплава 1201. Толщина листов достигает 40 мм. После обеспечения данной формы на гибочном стенде панели поступают для сварки. На рис. 2.90 представлена схема изготовления обечайки крупногабаритного бака. Сначала производится электронно-лучевая сварка (рис.2.90, а) продольных швов. После этого секция поступает на многошпиндельный фрезерный станок, где изготавливается вафельная конструкция (рис.2.90, б). Готовые секции поступают на стенд вертикальной сборки-сварки, на котором осуществляется гелиево-дуговая сварка кольцевых швов.

Нижнюю секцию устанавливают на стенд, сверху устанавливается следующая секция, с помощью разжимного кольца они между собой стыкуются. Стык фрезеруется наружным комплектом стенда на 6÷6,5 мм и свариваются за 2 хода. Затем фрезеруется изнутри корень шва на глубину $h=4^{=+0,5}$ мм. Свариваются секции очередным ходом изнутри и так далее до 9 ходов (рис.2.90, в). После заполнения, стык фрезеруется снаружи на глубину $h=6^{+0,5}$мм для удаления образовав-

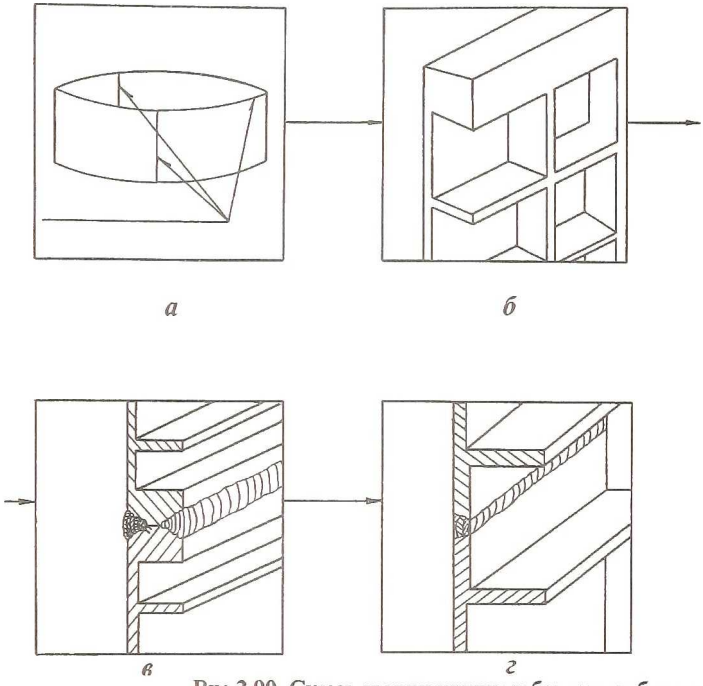


Рис.2.90. Схема сварки крупногабаритных баков

шихся дефектов, затем производится окончательное заполнение изнутри и снаружи, зачищается усиление сварного шва и проводится ренгеноконтроль качества сварного шва. После этого подсборку бака транспортируют на стенд механической обработки, где предварительно фрезеруют ячейки до глубины δ=12 мм (рис.2.90, г), а затем повторно проиводится рентгеноконтроль и окончательно фрезеруют ячейки. Аналогичным образом производится сборка-сварка последующих секций и днищ.

Стенд вертикальной сборки-сварки (рис.2.91) предназначен для изготовления крупногабаритных цилиндрических емкостей. Процесс сварки в стенде полностью механизирован и автоматизирован. Основными элементами стенда являются: вращающийся стол с закрепленными на нем домкратами, которые, в свою очередь, служат для установки подсборки бака.

Цилиндрическая секция бака ставится на домкраты, с помощью которых можно регулировать высоту. Разжимное кольцо так же крепится на домкратах. Регулируя с помощью домкратов высоту, подводим разжимное кольцо к стыку двух секций бака, и в этом месте производится разжим кольца, что позволяет точно совместить кромки обечаек бака. На вращающемся столе располагается внутренний комплект фрезерного и сварочного оборудования, что позволяет

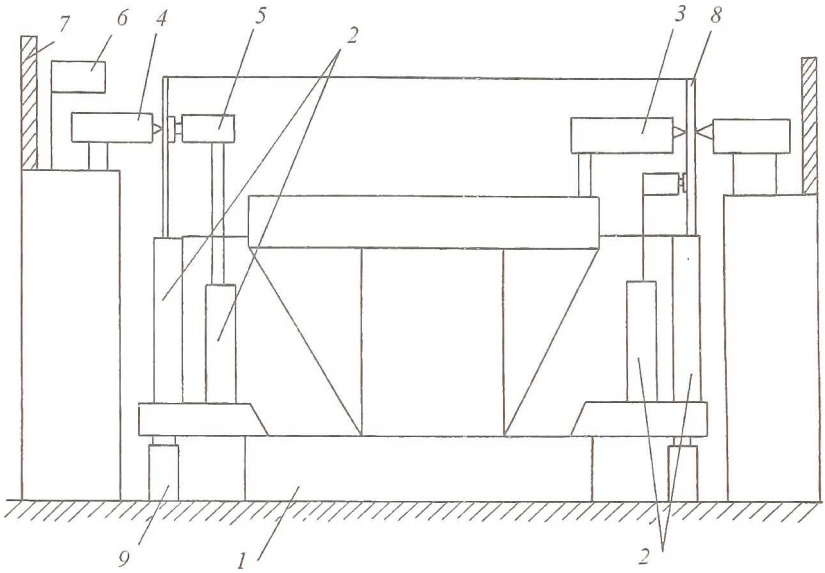


Рис.2.91. Упрощенная схема стенда вертикальной сборки-сварки:
1 - вращающийся стол; 2 - система домкратов; 3 - фрезерный станок; 4 - сварочная головка; 5 разжимное кольцо; 6 установка для рентгеноконтроля; 7 свинцовая защита; 8 - подсборка бака; 9 - подъемник

варить и обрабатывать швы изнутри. Для того чтобы сварка велась изнутри, необходимо обеспечить неподвижность подсборки бака. Для этой цели служит подъемник, который поднимает систему домкратов, тем самым нарушая связь с вращающимся столом. Сварка происходит поочередно с внутренней и внешней сторон. Когда происходит сварка с внешней стороны обечайки бака, подъемник опущен и происходит вращение стола и подсборки бака, тогда как внешнее сварочное и фрезерное оборудование неподвижно. Стенд позволяет контролировать качество шва посредством рентгеновской установки. Для защиты обслуживающего персонала от рентгеновского излучения на стенде имеется свинцовая защита.

После сварки на данном стенде емкость отправляют для дальнейшей сборки, затем подвергают серии различных испытаний.

Сборка-сварка сферических баков имеет свои специфические особенности, так как емкости данной группы, как правило, предназначены для высокого давления (до $3...4 \cdot 10^4$ кПа и выше). Эту группу емкостей отличает большая толщина стенок (10...15 мм), относительная простота конструкции (наличие штуцеров с клапаном и кронштейнов крепления), высокие требования к прочности и герметичности сварных швов. Материалами для них назначают высокопрочные сплавы и стали, иногда титановые сплавы. Технологические особенности этих изделий заключаются в следующем. Детали (полусферы,

днища, кольца) изготавливают партиями (материал одной плавки или прокатки). Полусферы часто производят методом горячей объемной штамповки за одно со штуцерами и сваривают между собой через промежуточный элемент кольцо (шпангоут), составляющий часть сферического обвода бака. Сварные швы подвергают индукционному отжигу высокой чистоты, зачистке и выглаживанию, после чего производится окончательная термообработка (закалка, двухкратный отжиг и т.д.). Сварные швы подвергают сплошному рентгеноконтролю. Цикл и программа испытаний существенно отличаются по сравнению с цилиндрическими, коническими и торовыми баками.

2.10. Сборка-сварка ферменных конструкций

Ферменные конструкции в ЛА применяются в качестве переходных отсеков (особенно при горячем разделении), ферм и этажерок для крепления приборов, каркасов антенн и панелей солнечных батарей, крепления двигательных установок.

Ферменные отсеки, как правило, являются отсеками, соединяющими между собой блоки, отсеки, баки. Обычно фермы размещают на цилиндрическом участке корпуса. В противном случае, для уменьшения аэродинамического сопротивления и нагрева, ферма должна закрываться панелями или крышками. Стержни соединяются между собой и присоединяются к башмакам с помощью сварки. Узлы фермы могут крепиться к отсекам ракеты без разъема в полете (с помощью болтового соединения) и с разъемом (с применением пиро- или пневмозамков). Для восприятия сдвигающих сил в местах крепления башмаков к корпусу размещаются шпильки (рис.2.92).

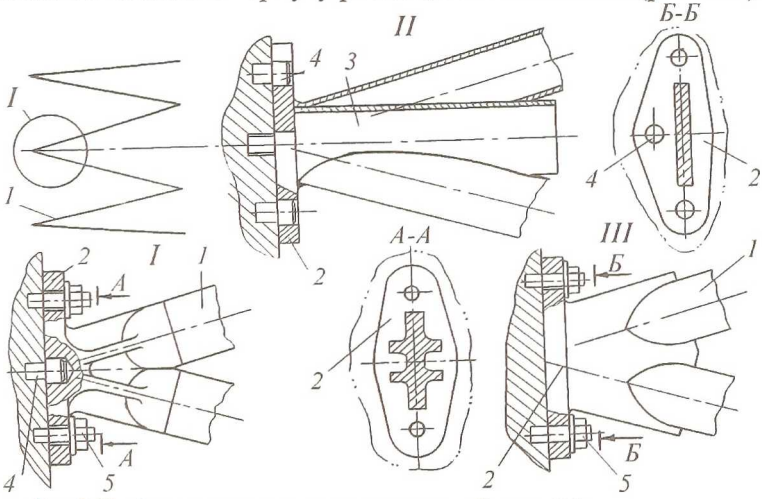


Рис.2.92. Фермы для крепления отдельных блоков ЛА:
1 - стержень, 2 - фитинг, 3 - замок, 4 - шпилька, 5 - крепеж; I, II, III - варианты крпеления ферм

Некоторые примеры ферм для крепления приборов показаны на рис.2.93. С точки зрения удобства монтажа приборов, их проверки и регулировки желательно приборы размещать на ферме вне ракеты, а затем вместе с фермой загружать в приборный отсек, подключая соответствующие разъемы.

Такие фермы свариваются, как правило, из магниевых труб *1* круглого или квадратного сечения, имеют втулки *2* для крепления приборов и фитинги *3, 4* для крепления фермы к корпусу *5* приборного отсека (рис.2.93).

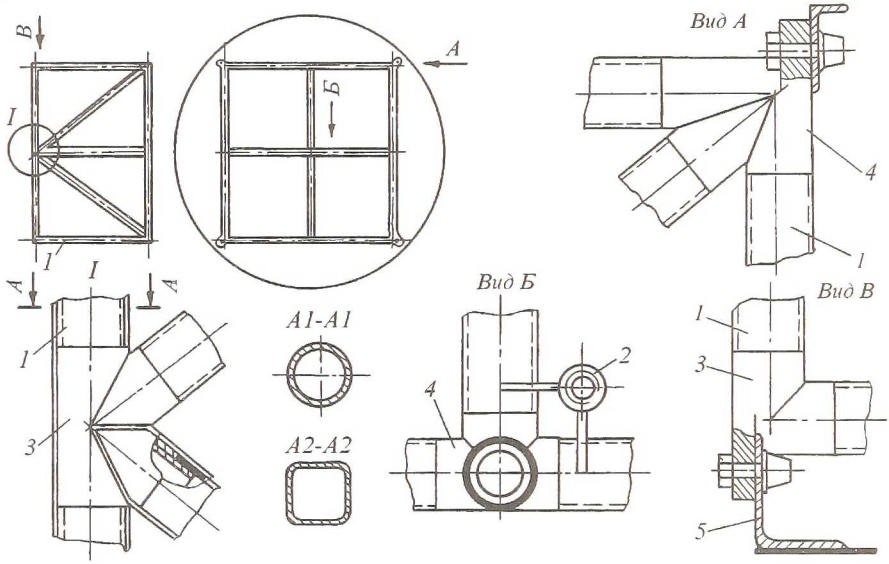


Рис.2.93. Фермы для крепления приборов

Применение фермы позволяет сделать компоновку более плотной и обеспечить с большей точностью положение центра масс. Стержни фермы при транспортировке и в полете могут воспринимать достаточно большие силы из-за перегрузок, действующих на приборы.

Фермы в своем большинстве статически неопределимы, но эта неопределимость может быть снята или уменьшена за счет симметричности фермы и симметричного расположения приборов.

Традиционными материалами для ферменных конструкций являются алюминиевые и магниевые сплавы, а в условиях работы при высоких температурах титановые сплавы. Для стержней, работающих на сжатие, особенно при высоких температурах, перспективно применение бериллия.

Стержни ферм, подсоединенные к бакам с криогенными компонентами, изготовляют из неметаллических композиционных материалов с металлическими законцовками. Это позволяет

устранить тепловые мосты между баками и остальной конструкцией. Основные затруднения при изготовлении ферменных конструкций вызываются значительными деформациями и короблениями, возникающими при сварке.

На рис.2.94 представлена ферменная конструкция - рама из алюминиево-магниевого сплава АМг6. Данная рама предназначена для крепления некоторых приборов в сухом отсеке ЛА. Она крепится с помощью серег к силовому набору отсека. Рама изготавливается из труб ∅30 мм с толщиной стенки 2 мм. Конструкция рамы относительно проста, однако автоматизировать процесс ее сварки затруднительно, т.к. она имеет небольшие по размерам сварочные швы сложной конфигурации. Конструкция приспособления для сборки-сварки рамы (рис.2.95) включает в себя основание *1*, боковые ребра *2, 3*, узлы *4, 5* для фиксации втулок и кронштейнов, зажимные планки *6* для фиксации труб, упорные штифты *7* для базирования деталей рамы, направляющие подставки *8* для фиксации наклонных труб.

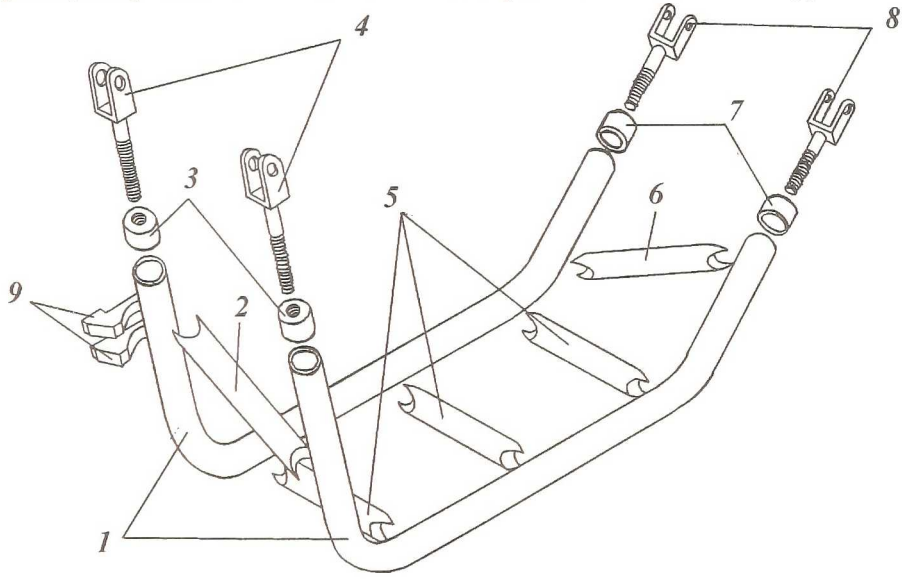


Рис. 2.94. Схема членения рамы:
1, 2, 5, 6 - трубы; 3, 7 - втулки; 4, 8 - серьги; 9 - кронштейны

Основной материал, использованный для изготовления приспособления сталь 45, которая применяется для средненагруженных деталей. Сталь 45 закаливается до HRC 40-45. Упорные штифты изготавливаются из стали У12А, которая закаливается до HRC 56-62.

Для обеспечения свободного съема сваренной рамы из приспособления боковая стойка *9* имеет возможность сдвигаться.

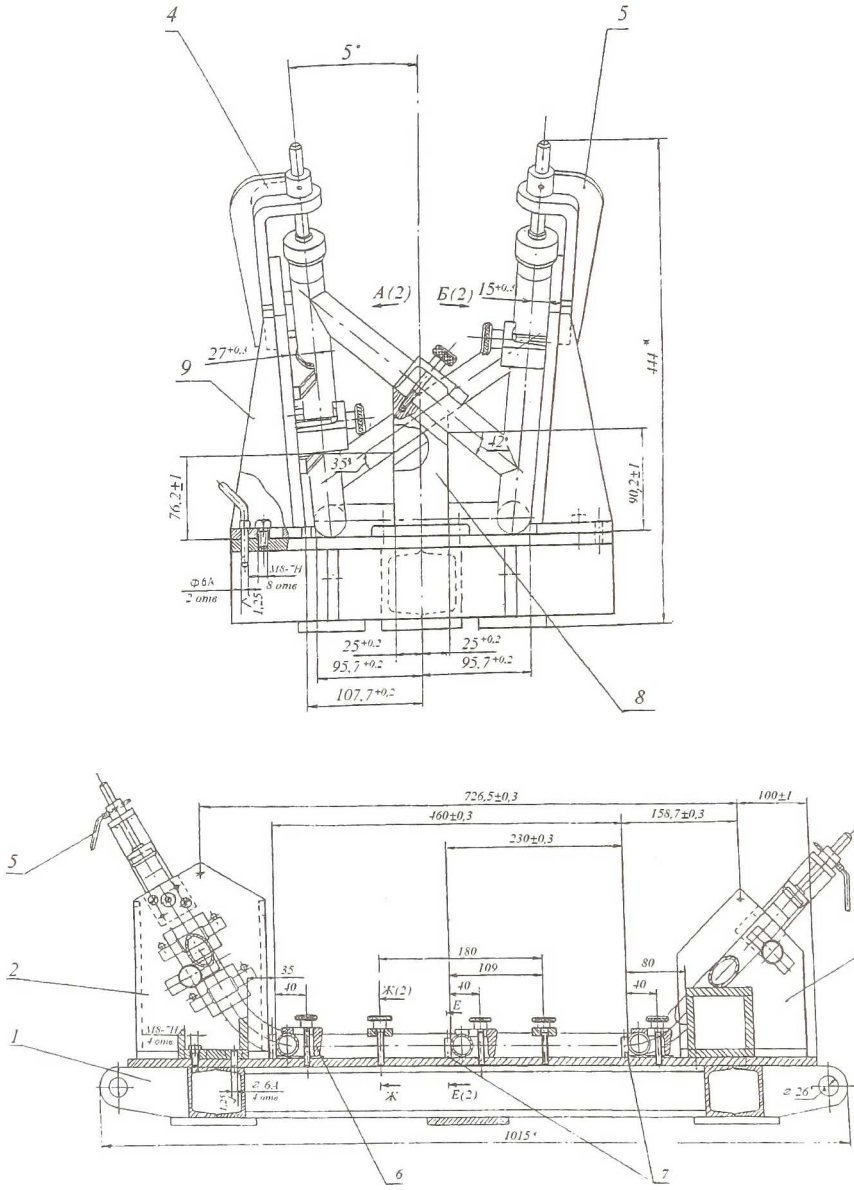


Рис.2.95. Приспособление для сварки рамы

Процесс изготовления рамы осуществляется в несколько этапов: отрезка трубчатых заготовок и гибка; изготовление кронштейнов, втулок и серег; подгонка труб под сварку; сборка-

сварка в приспособлении; термическая обработка; химическое покрытие; контроль.

При поставке элементов рамы в сварочный цех проводится проверка всей входящей комплектации на отсутствие механических повреждений, коррозии и загрязнений. Проверка проводится визуально. Затем проводится подгонка элементов рамы между собой и их закрепление в приспособлении. Подгонка осуществляется припиловкой в местах разметки. Допустимый местный зазор не более 0,5 мм. При необходимости подгонку проводят 2-3 раза. После подгонки обезжиривают свариваемые поверхности нефрасом. Со стороны проплава наносится очищающий флюс ФА-1Т, спустя 3-5 мин флюс удаляется шабером.

После контроля качества сборки осуществляется прихватка аргонодуговой сваркой. Места прихваток зачищаются и проводится правка стыкуемых кромок. Допустимый местный зазор 0,5 мм.

Ручная аргонодуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом на переменном токе осуществляется от источника питания ТИР 300Д, горелкой ГРАД-200. Параметры режима: сварочный ток 70-90 А; диаметр сопла 14 мм; диаметр электрода - 2 мм; диаметр сварочной проволоки - 2 мм; расход аргона - 10-12 л/мин; вылет электрода - 4-6 мм.

После проверки качества сварных швов осуществляется правка рамы. Допустимая деформация после сварки не более 6 мм, а после правки не более 1 мм. Правка производится деревянным молотком.

Затем рама устанавливается в приспособление и производится подгонка втулок, кронштейнов и приварка к раме. Для исключения деформации рамы производится отжиг всей рамы в печи.

Затем рама снимается из приспособления, проходит контроль, механическую обработку, химическое травление и выходной контроль.

При сборке-сварке ферм более сложной конструкции могут применятся универсально-сборные приспособления. При возможности целесообразно использовать автоматическую импульсно-дуговую сварку.

3. СБОРОЧНО-КЛЕПАНЫЕ И БОЛТОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

3.1. Особенности сборки отсеков клепаной конструкции

В производстве ЛА, особенно в самолето- и вертолетостроении, клепка до настоящего времени остается наиболее распространенным видом неразъемного соединения. Широкое применение клепка находит при сборке фюзеляжа, крыла, оперения, гондол двигателей. Она обеспечивает требуемую надежность и ресурс работы агрегатов планера, особенно в соединениях, где отсеки и агрегаты изготавливаются из высокопрочных алюминиевых сплавов, которые плохо свариваются.

В производстве КА клепка применяется значительно меньше. Клепаные отсеки служат для соединения смежных топливных баков с выпуклыми днищами и космической станции с носителем. На них крепят двигатель, баллоны, приборы, коммуникации. Обычно это тонкостенные конструкции, состоящие из обшивки, подкрепленной продольным и поперечным силовым набором. Силовой набор и обшивка крепятся к двум торцевым шпангоутам, с помощью которых отсек соединяется с соседними частями КА. Для доступа к приборам и оборудованию в обшивке таких отсеков имеются люки.

Некоторые клепаные конструкции наряду с прочностью должны обладать герметичностью и иметь требуемые аэродинамические обводы. Эти требования усложняют технологию клепально-сборочных работ.

Для повышения качества сборки и максимальной механизации клепально-сборочных работ конструкцию расчленяют на узлы, панели, секции и агрегаты. Схема такого членения закладывается при проектировании ЛА. Применение конструктивно-технологической схемы членения на панели и узлы дает возможность механизировать сверлильно-клепальные работы.

В зависимости от степени конструктивно-технологического членения отсеки и агрегаты подразделяют на непанелированные, частично панелированные и полностью панелированные.

Сборка непанелированных конструкций характеризуется большим объемом работ на одном рабочем месте (в одном сборочном приспособлении) и плохим доступом к местам соединения конструктивных элементов. Это увеличивает цикл сборки и затрудняет механизацию процесса. Трудоемкость сборки единицы массы непанелиро-

ванной конструкции в 3...5 раз превышает трудоемкость сборки панелированной.

Расчленение конструкции на панели обеспечивает дифференциацию и специализацию сборочных работ, позволяет сократить цикл сборки за счет параллельной сборки панелей и узлов в специальных приспособлениях и применения механизированной клепки.

Возможны различные варианты частично панелированных конструкций. В одном случае панели состоят из обшивки и только продольного силового набора или могут быть монолитными и соединяться с элементами поперечного набора в процессе сборки агрегата. В другом случае панели содержат как продольный, так и поперечный набор. При сборке панели соединяются друг с другом и торцевым силовым элементом, например, шпангоутом.

В полностью панелированных отсеках ЛА панели, кроме продольного и промежуточного поперечного силового набора, имеют секторы торцевых силовых элементов.

При конструктивно-технологическом членении должны удовлетворяться следующие основные требования:

- панели и узлы должны иметь открытый двусторонний подход к месту клепки;
- габаритные размеры панелей должны быть такими, чтобы было возможно максимально использовать высокопроизводительные сверлильно-зенковальные установки, пресса и автоматы;
- конструкции панелей должны позволять приклепывать стрингеры до установки поперечных элементов жесткости;
- стрингеры на плоских и цилиндрических панелях должны располагаться по возможности параллельно.

При выборе степени панелирования, применяемой при сборке агрегата, руководствуются экономическими расчетами, программой выпуска и специфическими требованиями к данному ЛА.

Известно, что дополнительные стыки утяжеляют конструкцию, поэтому при изготовлении РН и других ЛА с малым сроком службы требование к снижению их массы является более важным по сравнению с технологичностью изготовления и повышения ресурса.

В самолетостроении при значительной программе выпуска и высоких требованиях по ресурсу изделий применение панелирования экономически оправдывается. Так, на Ту-204 (рис.1.5) широко применяется панелирование при изготовлении фюзеляжа, крыла, гондол двигателей.

3.2. Общая характеристика технологических процессов клепки и постановки болтов

В конструкциях современных ЛА широко используются заклепочные и болтовые соединения. Разнообразие условий работы и

выполнения соединений и широкий спектр требований к ним по обеспечению прочности, долговечности, герметичности, гладкости обтекаемых поверхностей обусловили разнообразие конструкций крепежных элементов соединений, технологических процессов, а также инструмента и оборудования для их постановки [13].

Наиболее широко используются стержневые заклепки с закладными головками различной формы, при постановке которых замыкающие головки формируют из концевой части стержня заклепки. В герметичных конструкциях для предотвращения утечек газов и жидкостей применяются особые заклепки, технологические процессы их постановки и герметизирующие материалы.

В общем виде технологический процесс выполнения заклепочного соединения включает следующие операции (рис.3.1):

- получение отверстия в пакете сверлением или пробивкой;
- получение гнезда под потайную головку заклепки зенкованием или штамповкой;
- установка заклепки в отверстие вручную или механически;
- образование замыкающей головки;
- зачистка припусков на потайных головках (при необходимости);
- контроль качества пооперационный или по готовому изделию.

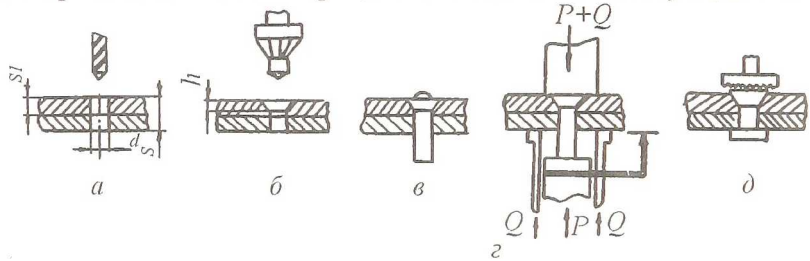


Рис.3.1. Операции технологического процесса клепки:
а - получение отверстия; б - выполнение гнезда под потайную головку заклепки; в - установка заклепки; г - формирование замыкающей головки; д - зачистка

Каждая из перечисленных операций процесса соединения выполняется в сборочном приспособлении или на специальном рабочем месте станке, прессе, при автоматической клепке все операции осуществляются на одном клепальном автомате.

При раздельном выполнении операций качество работы зависит от состояния оборудования и квалификации исполнителей. При таком методе работы после каждой операции контролируют её качество. При автоматической клепке выполнение отдельных операций и переходов контролируется при наладке-настройке автомата. Независимо от того, как производится процесс клепки, соединение контролируют в законченном виде на узле или панели [72].

Технологический процесс выполнения болтового соединения содержит следующие основные операции:

- образование отверстия под болт;
- доводка отверстия до требуемого квалитета и класса шероховатости;
- упрочнение отверстия раскаткой или дорнованием;
- образование гнезда под головки потайных болтов;
- постановка болта в отверстие с натягом. Натяг задается в процентах от диаметра отверстия;
- завинчивание гайки и контровка вручную, механически с фиксацией силы затяжки.

Таким образом данные технологические процессы имеют общие операции, связанные с образованием отверстий и гнезд под головки потайных заклепок и болтов.

3.3. Процессы образования отверстий и гнезд под головки потайных заклепок

Для обычных стержневых заклепок отверстия образуют пробивкой или сверлением [29, 70, 72].

Пробивка или штамповка отверстий в деталях является высокопроизводительным процессом и выполняется на дыропробивных прессах. Однако этот процесс имеет ряд недостатков: возможны выпучивание и нагартовка (наклеп) материала деталей вокруг стенок отверстия, появление трещин, рваных краев и заусенцев. Поэтому обычно штамповку применяют только для получения сборочных или направляющих отверстий, диаметр которых меньше номинального диаметра. Затем эти отверстия рассверливают или протягивают до требуемого размера.

В зависимости от технологического процесса сборки-клепки и применяемого при этом инструмента и оборудования сверление и зенкование гнезд можно выполнять:

- раздельно в каждой соединяемой детали;
- одновременно во всех деталях, входящих в собранный пакет;
- одновременно за один ход инструмента сверлят отверстия во всех деталях пакета и зенкуют гнездо в верхней детали с помощью сверла-зенковки (рис.3.2).

Совместное сверление и зенкование отверстий отличается высокой производительностью и лучшим качеством соединения. При этом способе хорошо совпадают отверстия во всех деталях соединяемого пакета и центр отверстия с центром гнезда под потайную головку заклепки.

Для сверления отверстий в деталях из алюминиевых сплавов применяют спиральные сверла из углеродистой и быстрорежущей стали, а при сверлении в деталях из стали 30ХГСА сверла с пластинами из твердых сплавов. Основное требование к отверсти-

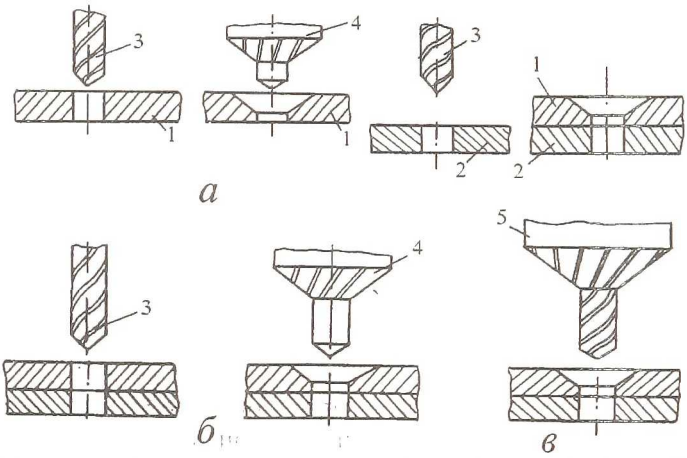


Рис.3.2. Методы получения отверстий и гнезд под потайные головки заклепок:
а раздельное в каждой детали пакета; б в пакете с использованием двух инструментов; в - в пакете комбинированным инструментом; 1 - обшивка; 2 - элемент каркаса; 3 - сверло; 4 - зенковка; 5 - сверло-зенковка

ям - это прямолинейность оси отверстия и перпендикулярность к поверхности или касательной соединяемых деталей. Овальность отверстия допускается только в пределах допуска на диаметр.

В производстве ЛА наиболее распространены следующие виды сверлильно-зенковального оборудования:

- ручные пневматические и электрические дрели;
- универсальные сверлильные станки;
- специальные сверлильно-зенковальные станки (автоматы) и установки;
- сверлильно-зенковальные и агрегатные головки.

Пневматические дрели применяют главным образом на агрегатной и общей сборке, где использование станков и автоматов невозможно. При сверлении отверстия для обеспечения перпендикулярности оси сверла к обрабатываемой поверхности изделия в дрели закрепляют специальную центрирующую насадку. В случае одновременного сверления и зенкования гнезда в дрели закрепляют зенковальную насадку. Использование такой насадки позволяет получать требуемую глубину гнезда под головку потайной заклепки. Глубина гнезда регулируется путем установки упора на заданный размер гнезда.

Для сверления отверстий в крупногабаритных деталях и в деталях, имеющих кривизну, применяются специальные сверлильно-зенковальные установки (рис.3.3). Производительность установки 20…25 отверстий в минуту.

При сверлении отверстий в продольных швах панель фиксируется в неподвижном состоянии, а головка СЗА-02 и прижим пере-

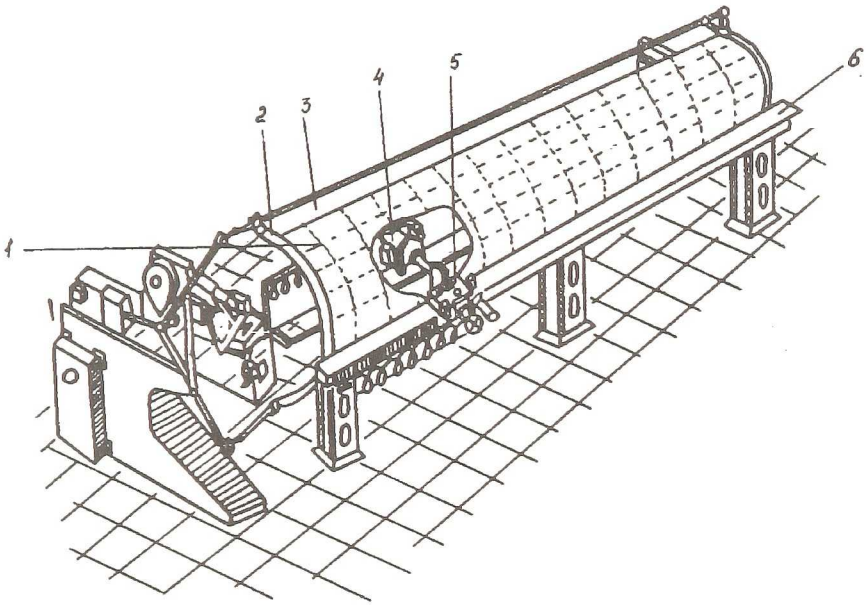


Рис.3.3. Сверлильно-зенковальная установка СЗУ-Ф1:
1 - панель; 2 - ложемент для базирования панели; 3 - рама позиционера панели; 4 - поддерживающий агрегат; 5 - сверлильно-зенковальный агрегат; 6 - направляющие

мещаются вдоль шва. Головка и прижим устанавливаются в требуемое положение (центр отверстия) по копирам автоматически. При сверлении отверстий в поперечных швах шпангоутах - головка и прижим фиксируются в неподвижном состоянии, а панель поворачивается на требуемый угол в зависимости от расстояния между отверстиями.

Сверлильно-зенковальные и агрегатные головки обычно крепят непосредственно на сборочном приспособлении на специальной траверсе. Оснащение стапеля подобным оборудованием позволяет получить отверстия в сборочном положении, т.е. без выемки агрегата из стапеля.

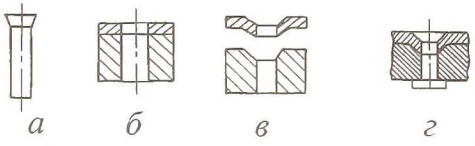


Рис.3.4. Образование гнезда под потайную заклепку штамповкой:
а - заклепка; б пакет; в образование гнезда; г - соединение

Получение гнезд под головки потайных заклепок может производиться не только зенкованием, но и штамповкой. Штамповку применяют в тех случаях, когда толщина наружной обшивки меньше высоты головки потайной заклепки (рис.3.4). При этом в нижней детали производится зенковка.

штамповка производится в каждой из них отдельно или совместно. Для штамповки гнезд под потайные головки заклепок применяются специальные приспособления, в которых размеры и форма матрицы и пуансона увязаны с размерами и формой головки заклепок.

В производстве ЛА широко используют в процессе сборочных работ развертывание и протягивание отверстий.

При постановке болт-заклепок и болтов с натягом возникает необходимость в получении классных отверстий с высокой точностью. Для заклепок с высоким сопротивлением срезу применяются плотная или скользящая посадки стержня в отверстие. Такие отверстия обычно сверлят, зенкеруют, развертывают или протягивают. Обычно при развертывании снимается припуск 0,06...0,3 мм на диаметр, оставшийся после сверления.

Развертывание проводится в несколько этапов комплектом разверток и относится к трудоемким и дорогостоящим процессам. Более рационально использование для получения высокоточных отверстий протягивания. Так, например, если развертывание позволяет получить отверстия H7, H8, H9 квалитетов точности и 7-го класса шероховатости поверхности, то протягиванием можно повысить класс шероховатости поверхности до 8-го...10-го, что увеличивает ресурс соединения.

При протягивании обычными протяжками на поверхности отверстия образуются продольные риски. Чтобы избежать этого, применяют протяжку с винтовыми режущими частями и процесс протягивания ведут с вращением инструмента. Кроме того, такая протяжка осуществляет пластическую деформацию стенок отверстия и тем самым его упрочнение.

Другими способами упрочнения отверстий являются дорнирование или раскатывание отверстий, которые будут описаны ниже (см.3.6).

3.4. Методы клепки, материалы и типы заклепок

Процесс клепки заключается в осаживании стержня заклепки и образовании замыкающей головки или обеих головок при клепке стержнями [13, 29, 70].

Образование замыкающей головки может осуществляться тремя методами (табл.3.1): ударом; прессованием; раскаткой.

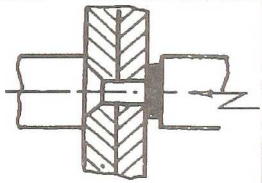
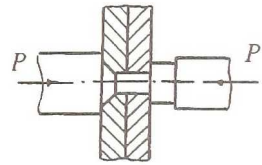
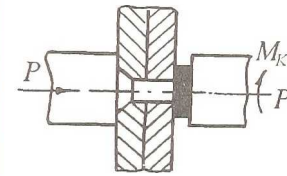
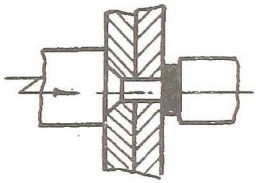
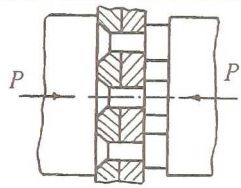
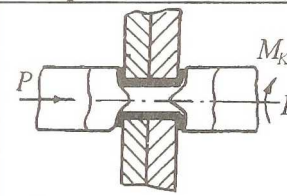
Ударная клепка осуществляется клепальным молотком. В зависимости от того, с какой стороны находится молоток по отношению к закладной головке, различают два метода клепки: прямой и обратный.

В процессе прямой ударной клепки массивная поддержка поджимается к поверхности детали и к закладной головке заклепки. При ударах молотка по стержню заклепки силы направлены вдоль

В процессе прямой ударной клепки массивная поддержка поджимается к поверхности детали и к закладной головке заклепки. При ударах молотка по стержню заклепки силы направлены вдоль

Таблица 3.1.

Методы образования замыкающих головок

Удар	Прессование	Раскатка
 Прямая клепка	 Одиночная	 Стержневая заклепка
 Обратная клепка	 Групповая	 Трубчатая заклепка

оси заклепки и передаются на поддержку, не вызывая при этом перемещений и деформаций склепываемых деталей.

Применение массивных с большой опорной поверхностью поддержек исключает местные деформации деталей при клепке и обеспечивает хорошее качество внешней обтекаемой воздушным потоком поверхности клепаного шва.

В процессе обратной ударной клепки обжимка молотка соприкасается с поверхностью обшивки и потайной головкой заклепки. При малейшем наклоне обжимки молотка на поверхности детали при ударах получаются вмятины, и повреждается плакирующий слой. В результате качество поверхности клепаного потайного шва при обратной ударной клепке будет хуже, чем при прямой.

Прессовая клепка характеризуется тем, что замыкающая головка заклепки формируется при равномерном сжатии стержня. Различают одиночную и групповую прессовую клепку. При одиночной клепке за один ход пресса расклепывается одна заклепка, а при групповой несколько. Отличием прессовой клепки от ударной является наличие предварительного сжатия пакета перед постановкой заклепки. Предварительное сжатие пакета обеспечивает плотное соединение деталей в процессе клепки и оказывает существенное влияние на качество заклепочного соединения.

Клепка раскаткой заключается в последовательном деформировании малых объемов материала заклепки при небольших осевых

силах. Высокие напряжения в зоне деформации обеспечиваются за счет малой площади контакта (рис.3.5). Форма замыкающей головки может быть различной. Раскатка осуществляется на специальных станках с помощью раскатных насадок. Потайные заклепки после раскатки фрезеруются. При малых осевых усилиях и большом времени раскатки не происходит деформации стержня заклепки, поэтому данный метод применяется для клепки заклепок из хрупких материалов и получения подвижных соединений.

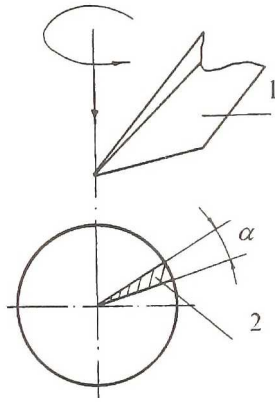


Рис.3.5. Клепка раскаткой: 1 - инструмент; 2 - площадь контакта

При образовании заклепочного соединения длина заклепки выбирается таким образом, чтобы обеспечить образование правильной замыкающей головки.

При работе соединения на отрыв возможны следующие разрушения (рис.3.6): разрыв стержня заклепки или срез головки заклепки. Параметры замыкающей головки должны обеспечивать условия равнопрочности соединения.

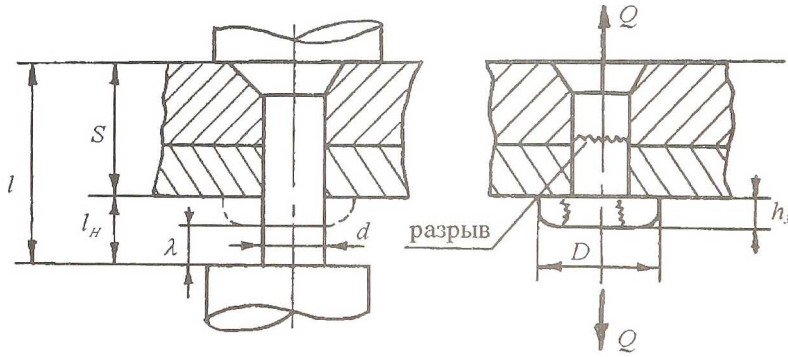


Рис.3.6. Образование заклепочного соединения

$$\frac{\pi d^2}{4}\sigma_B = \pi d h_3 \tau_{CP} \quad , \quad \tau_{CP} \approx 0{,}6\sigma_B \ .$$

Подставляя τ_{CP}, получим соотношение: $h_3 \approx 0{,}4d$.

Аналогично из условия смятия получим $D \approx 1{,}6d$. Таким образом, для получения замыкающей головки с заданными параметрами выступающая часть заклепки должна составлять (1,1…1,3)d, а длина заклепки равняться $l = S + (1{,}1 \ldots 1{,}3)d$.

В производстве ЛА применяются стержневые заклепки из различных материалов и с различной формой закладной головки. Примеры применяемых заклепок приведены в табл.3.2. Все заклепки нормализованы. Нормали имеют определенный шифр, классифицирующий заклепки по типу закладной головки, марке материала, диаметру и длине заклепок. Например, заклепка с плоской головкой из Д19П диаметром 5 мм и длиной 10 мм будет обозначаться 3504А5-10.

Таблица 3.2.

Типы и марки заклепок

Тип заклепки		Материал		Маркировка
ЗК	с полукруглой головкой	алю-	В65	без маркировочных знаков
ЗУ-90	с потайной головкой (90°)	ние-	Д1В	1 точка
ЗУ-120	с потайной головкой (120°)	вые	АМг54	2 точки
ЗДК	с двойным конусом		АМц	3 точки
ЗВУ	с плоско-выпуклой	спла	Д19П	4 точки
ЗВАДУ	головкой	-вы	АД1	черта
ЗП	с плоской головкой	с т	20Г2	1 точка
ЗУКС	с потайной головкой, образованной двумя конусами	а л и	10 15 Х18Н9Т	без маркировочных знаков
ЗУК	потайная с компенсатором	медь и	М2	без маркировочных знаков
ЗУКК	с компенсатором	ла-тунь	Л62	без маркировочных знаков

Основные материалы заклепок - это алюминиевые сплавы В65, Д19П, АМу, стали 20Т2, Ст15, Ст10, Х18Н9Т, медные и латунные сплавы М2, Л62.

Для того, чтобы по внешнему виду различать марку материала, из которого изготовлена заклепка, на головках заклепок ставят условные знаки в виде выпуклых или углубленных точек, крестиков и т.д. (см. табл.3.2).

В соответствии с принятыми диаметрами стержневых заклепок в нормалях указаны и диаметры отверстий под заклепки, которые имеют больший размер, чем диаметр стержня заклепки. Определенное соотношение диаметров заклепок и отверстий под них позволяет легко

вставить заклепку в отверстие и одновременно хорошо заполнить его стержнем заклепки в процессе образования замыкающей головки. Например, для заклепок диаметром 5 мм сверлится отверстие диаметром $5{,}1^{+0{,}16}$ мм. Если отверстие меньше допустимого, то заклепку приходится забивать в отверстие, это может привести к ее повреждению и повреждению склепываемых деталей. Если отверстие большего размера, то стержень заклепки при осадке может загнуться и неплотно заполнить отверстие, это уменьшает прочность полученного соединения.

Так как при образовании заклепочного соединения происходит деформация стержня, находящегося в отверстии, и заполнение отверстия материалом заклепки, в некоторых случаях это приводит к увеличению диаметра отверстия, упрочнению его стенок.

Рассмотрим наиболее распространенные виды клепки обычными стержневыми заклепками.

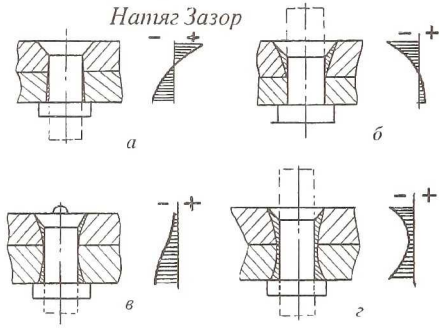


Рис.3.7. Различные виды клепки и их основные характеристики:
а клепка с образованием плоской замыкаю-щей головки; б - клепка с образованием потай-ной замыкающей головки; в - клепка заклеп-ками с компенсаторами; г - клепка стержнями

При клепке с образованием плоской замыкающей головки происходит утолщение стержня и образование натяга (рис.3.7, а) в обшивке со стороны замыкающей головки. Приняв выносливость такого наиболее часто применяемого соединения за 100%, рассмотрим другие возможные виды соединений.

При клепке с образованием потайной замыкающей головки происходит упрочнение листа в месте зенкованного гнезда. И в данном случае получается натяг с одной стороны, со стороны замыкающей головки, выносливость такого соединения значительно выше и составляет порядка 200% (рис.3.7, б). Получение натяга во всем соединении можно достичь, применяя заклепки с компенсатором (рис.3.7, в). Такие заклепки имеют дополнительный материал на поверхности головки потайной заклепки. При клепке этот материал деформируется и заклепка более полно заполняет зенкованное гнездо. За счет дополнительного материала и со стороны закладной головки образуется небольшой натяг. Выносливость такого соединения составляет порядка 300%.

При клепке стержнями натяг образуется по всему сечению (рис.3.7, г), данный вид соединения может быть получен прессованием, тогда как первые три вида клепки могут выполняться и ударом. Выносливость такого соединения составляет 600...700%. Клепка стержнями и

заклепками с компенсатором применяется для получения герметичных, наиболее ответственных соединений.

Неравномерность деформации стержня заклепки по толщине пакета может привести к искажению склепываемых деталей (рис.3.8).

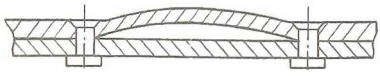


Рис.3.8. Искажение обшивки в процессе клепки

Наибольшее искажение формы деталей бывает при клепке с образованием потайной замыкающей головки, наименьшее при клепке заклепками с компенсатором и стержнями. Для предотвращения искажения деталей рекомендуется при соединении деталей каркаса ставить закладную головку пооче-редно с разных сторон пакета. При клепке пакетов разной толщины или различных материалов замыкающую головку рекомендуется ста-вить со стороны более жесткой детали или более твердого материала.

Образование заклепочного соединения производится в основном прессовым способом или ударом. При прессовой клепке применяют клепальные прессы или автоматы, а при ударной - клепальные молотки [47].

При сборке узлов и агрегатов, имеющих замкнутые контуры и затрудненный доступ к местам постановки заклепок, в сборочных приспособлениях и на участках внестапельной доработки применяется многоударная клепка пневматическими молотками. При этом в общем объеме клепальных работ при производстве ЛА ударная клепка составляет от 20 до 40% в зависимости от типа объекта производства и технологичности его конструкции. Достоинством ручной ударной клепки является ее универсальность.

При ударной клепке образование замыкающей головки осуществляется за несколько десятков ударов в течение нескольких секунд со скоростью осаживания на 1...2 порядка больше, чем при прессовой клепке. Во время работы молоток сильно вибрирует, вследствие чего только высокая квалификация клепальщика, его опыт и умение "чувствовать" заклепку могут обеспечить высокие качество клепки и производительность труда. Немалую роль играет при этом и мастерство подручного, который во время клепки фиксирует заклепку с помощью поддержки. Форма и габаритные размеры поддержки определяются, с одной стороны, конструкцией собираемого изделия, диаметром и материалом заклепки, а с другой - способом клепки, прямым или обратным, в зависимости от того, с какой стороны по отношению к замыкающей головке находится клепальный молоток.

При прямой клепке поддержка удерживает закладную головку, а молоток формирует замыкающую. Поскольку заклепка в начале процесса осаживания выталкивается молотком из отверстия, то для обеспечения плотного прилегания закладной головки к пакету поддержка должна быть достаточно массивной.

При обратной клепке поддержка формирует замыкающую головку, а молоток наносит удары по закладной головке, а через нее и по склепываемому пакету. Масса поддержки при этом способе клепки может быть значительно меньше, поскольку закладная головка при клепке прижимается молотком к пакету, а смещение поддержки при ударе меньше смещения пакета. Различные типы клепальных молотков и поддержек приведены на рис.3.9.

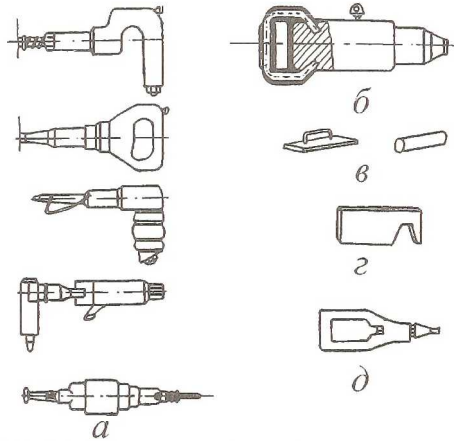


Рис.3.9. Клепальный инструмент:
а - клепальные молотки; б типовая конструкция поддержки для прямого метода клепки; в поддержки для клепки в открытых для доступа местах обратным методом; г поддержка для клепки в полузакрытых местах обратным методом; д - инерционная поддержка с виброгасящим устройством

Очевидно, что клепка по этому способу может быть только многоударной. Обратная клепка обеспечивает высокое качество соединения и особенно широко применяется при клепке заклепок с потайной закладной головкой, так как при этом достигается удобство работы клепальным молотком. Поддержку же значительно легче ввести в труднодоступные места или придать ей необходимую форму. Одна-ко работа клепальщика осложняется тем, что момент окончания клепки он должен определять интуитивно, на основании своего опыта, что, естественно, сказывается на качестве клепки.

Работа пневмомолотков сопровождается сильным шумом и вибрациями. Установлено, что порог чувствительности при их сочетании повышается по сравнению с их раздельным воздействием в 1,7…1,8 раза, виброчувствительность - в 1,1…1,2 раза. Высокочастотный шум 97…115 дБ вызывает у клепальщиков целый ряд профзаболеваний. Кроме того, в зависимости от диаметра расклепываемой заклепки меняется и масса используемых ручных машин: чем больше диаметр заклепки, тем тяжелее молоток.

Одним из путей борьбы с профзаболеваниями клепальщиков является разработка и внедрение обладающих пониженными параметрами шума и вибрации ручных и переносных машин для одноударной клепки, например, импульсных.

Импульсный метод клепки отличается тем, что удар по стержню заклепки наносится твердым телом, движущимся с большой скоростью - до 100 м/с. При одноударной клепке, когда замыкающая головка образуется за 1…2 тысячных долей секунды, время клепки, а следовательно, и

время воздействия шума и вибрации на клепальщика существенно меньше, чем при многоударной.

Перемещение обжимки при формировании замыкающей головки заклепки происходит сразу на весь путь деформирования, подобно тому, как это происходит при прессовой клепке, и поэтому клепка возможна либо прямая, либо встречная.

Поскольку влиять на процесс клепки ввиду его кратковременности клепальщик не может, то его функции сводятся только к позиционированию молотка и управлению. По этим причинам качество клепки возрастает, а необходимая квалификация клепальщика снижается.

В настоящее время разработаны, испытаны и переданы для промышленного применения ручные клепальные молотки, обеспечивающие получение высокоресурсных соединений.

В зависимости от природы источника, создающего силовой импульс, машины импульсного действия можно разделить на пневматические, пороховые, пневмогидравлические, магнитно-импульсные.

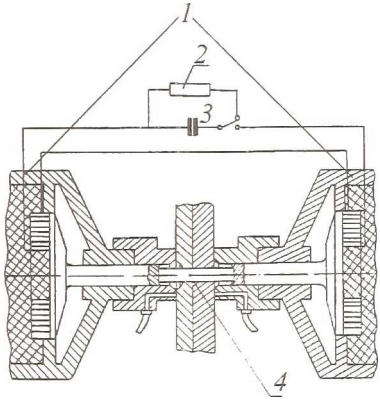


Рис.3.10. Магнитно-импульсная клепка стержнями с помощью магнитно-им-пульсной клепальной системы, работа-ющей по принципу синхронизированно-го двустороннего обжатия стержня:
1- клепальные молотки; 2 - источник постоянного тока; 3 - конденсаторы; 4 - стержень

Магнитно-импульсные молотки используют в качестве энергоносителя импульсное электромагнитное поле высокой напряженности, они могут обеспечить клепку стержней-заклепок диаметром 9,5мм из алюминиевого сплава. Молотки массой более 34 кг каждый подвешены на балансирах и располагаются по обе стороны вертикально закрепленной в стапеле панели (рис.3.10). Клепку производят два оператора. Соосное положение инструментов относительно друг друга и расклепываемого стержня отмечается сигналом: загоранием электролампы, расположенной на одном из инструментов. Получив сигнал, клепальщих нажимает на кнопку, и батарея конденсаторов разряжается через последовательно соединенные катушки молотков. Взаимодействие полей токов в катушках и индукционных токов в прилегающих к ним бойках обусловливает возникновение между ними электродинамических сил отталкивания, деформирующих заклепку. Передача энергии к катушкам осуществляется по кабелям с малым сопротивлением.

Как видно, отличительной особенностью магнитно-импульсной клепки является возможность синхронизации двух и более молотков с точностью 10^{-6} с, что позволяет найти принципиально новые пути решения проблем встречной клепки ручными молотками, клепки со сжатием пакета и др.

Установлено, что при магнитно-импульсной клепке возникает ряд специфических явлений, определяемых кратковременностью процессов и наличием больших пластических деформаций. Взаимодействие обжимки с пластически деформируемым металлом стержня заклепки в течение 1...2 мс приводит к возникновению в металле инерционных сил, которые, в свою очередь, вызывают дополнительные динамические напряжения. Изменяется область, охваченная пластическими деформациями. Инерционные силы препятствуют распространению деформаций, что уменьшает или локализует зоны пластического деформирования. Это связано также с развитием тепловых эффектов, волновых явлений и некоторыми изменениями механических свойств деформированного металла.

Локализация зоны пластического деформирования объясняется прежде всего тем, что в процессе, например высокоскоростного осаживания, скорости на различных участках пластической деформации металла различны. Максимальную кинетическую энергию накапливают объемы, расположенные в верхних периферийных точках, и значительно меньше энергии накапливается в нижних точках образца.

Деформирование металла с высокими скоростями характеризуется значительными инерционными силами. Их возникновение объясняется изменением скоростей перемещения частиц металла, вызванным ударом обжимки. Ускорения, действующие на обрабатываемый металл, зависят от изменения скорости инструмента и положения точек в системе деформируемого тела.

В момент приложения деформирующей нагрузки силы инерции, имея противоположный знак, уменьшают действие внешней нагрузки. Энергетически это объясняется как расходование работы деформирования на преодоление работы инерционных сил, что и выражается в уменьшении очага деформации. Данное обстоятельство имеет большое значение для оценки и разработки технологических процессов клепки.

Известно, что высокий ресурс заклепочного соединения в однородных материалах требует создания высокого и равномерного натяга, или другими словами, остаточных сжимающих напряжений в материале соединяемых деталей. Для получения высокопрочного соединения нужно обеспечить выборку технологического зазора в отверстии под заклепку и получить натяг 4...5%. При расклепывании стержень заклепки, деформируясь, увеличивается в диаметре и вдавливается в стенки отверстия, вызывая его радиальную деформацию и

упрочнение, т.е. создает натяг, который в идеальном случае было бы желательно получить равномерным по всей толщине пакета. Обычным методом клепки пневматическим ударным инструментом стержневых заклепок этого добиться нельзя, поскольку при расклепывании стержень заклепки, деформируясь, принимает бочкообразную форму и выбирает технологический зазор между цилиндрической частью отверстия и заклепкой. Увеличения силы приводят к заклиниванию стержня и образованию замыкающей головки. В результате под закладной головкой заклепки натяга может не быть вообще. Это способствует снижению выносливости соединения, кроме того, оно негерметично.

С целью проверки качества соединений при импульсной клепке ЦАГИ были проведены прочностные испытания образцов по стандартной программе сравнительных усталостных испытаний заклепочных соединений. Установлено, что выносливость соединений, выполненных импульсным молотком с образованием полукруглой замыкающей головки, превосходит в 2 раза выносливость соединений, выполненных с помощью пневмомолотка. Выносливость же соединений, выполненных импульсным молотком с образованием плоской замыкающей головки, ниже, чем выносливость соединений, выполненных с помощью пневмомолотка. Обусловлено это, вероятно, более низким натягом в отверстии при импульсной клепке с образованием плоской замыкающей головки пакетов толщиной более половины диаметра заклепки.

Установлено, что стеснение объема замыкающей головки способствует увеличению силы расклепывания и натяга заклепки в пакете.

Таким образом, импульсная клепка за счет получения высокого и равномерного натяга, равномерного и плотного прилегания закладной головки к поверхности детали и отсутствия трещинообразования обеспечивает высокое качество соединения.

Образование зазора под закладной головкой на первом этапе импульсной клепки является положительным фактором, так как способствует увеличению равномерности натяга. Это приближает данный способ клепки по качеству к способу клепки стержнями, отличающемуся наиболее высокой равномерностью натяга.

По результатам прочностных испытаний ЦАГИ рекомендует применять импульсные молотки взамен пневмомолотков при клепке конструкций с образованием полукруглой замыкающей головки.

Прессовая клепка характеризуется тем, что замыкающая головка заклепки формируется при равномерном сжатии стержня со скоростью до 1…2 м/с. Как отмечалось ранее, различают одиночную и групповую прессовую клепку. Как показал опыт, высокое качество заклепочных соединений достигается при одиночной, а не групповой клепке. Причиной тому является более стабильный натяг заклепки в

отверстии при одиночной клепке. Поскольку пресс групповой клепки настраивается на высоту замыкающей головки, то все отклонения параметров соединения диаметров отверстия и стержня заклепки, толщины пакета и длины стержня заклепки, размеров зенкованного гнезда нивелируются по всей группе одновременно расклепываемых заклепок. В результате при высоком качестве клепки в целом зачастую попадаются заклепочные соединения с недостаточным натягом, характеризующиеся малой герметичностью и низкой усталостной прочностью.

Вследствие этого недостаточная технологическая надежность процесса получения заклепочных соединений может снизить эксплуатационную надежность изделия в целом.

Прессы для одиночной клепки настраиваются, как правило, на силу расклепывания, что позволяет обеспечить постоянный натяг во всех соединениях, поскольку колебания вышеупомянутых параметров будут компенсированы за счет объема замыкающей головки заклепки. По указанным причинам прессы для групповой клепки начинают применять для расклепывания не более чем двух заклепок одновременно.

Возможность применения того или иного пресса зависит от подходов к месту клепки, диаметра и материала заклепок, размеров узлов и панелей и других конструктивных и технологических факторов.

Увеличение объема прессовой клепки достигается усовершенствованием конструкций облегченных ручных прессов путем максимального снижения их массы, обеспечения достаточно высоких сил и возможности подхода к требуемой рабочей зоне. Переносные прессы в виде скоб (подвесных или ручных) позволяют механизировать процесс и обеспечить расклепывание заклепок больших диаметров или из высокопрочных материалов. Применяются эти прессы в условиях стапельной сборки или внестапельной доработки узлов и агрегатов, когда клепка на стационарном оборудовании невозможна или нецелесообразна. Ручные прессы отличаются высокой работоспособностью, небольшой массой, портативностью и удобством в работе (рис.3.11). Главными их недостатками можно считать ограничения по вылету скобы и быстрый рост массы скобы с увеличением вылета и силы прессования. Поэтому в практике редко применяют скобы с вылетом более 300 мм и силой прессования более 8 т.

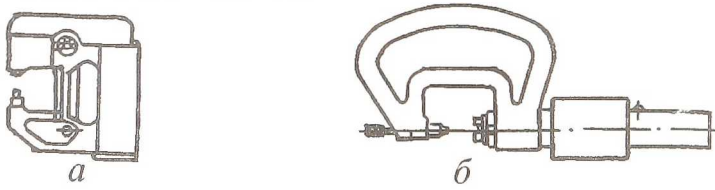


Рис.3.11. Переносные клепальные скобы:
а - форма скобы К-клещи; б - форма скобы Б-бугель

В промышленности применяется большое число стационарных прессов для групповой и одиночной клепки: КП-204М; КП-405М, КП-406, КП-501А, КП-503, КП-602 (рис.3.12).

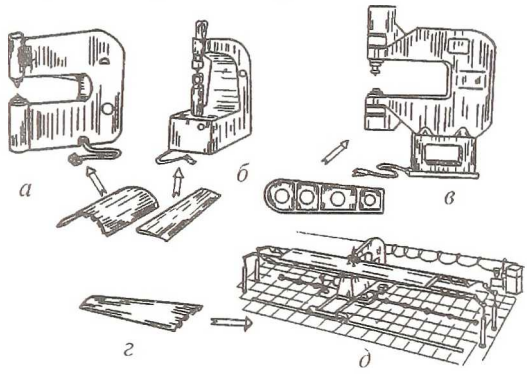


Рис.3.12. Клепальные прессы:
а - КП-501А; б - КП-503; в КПК-406; д - клепальный пресс с выравнивающим устройством

Широкое применение прессовой клепки в производстве ЛА связано с такими достоинствами прессовой клепки, как: высокое качество и стабильность соединений, не зависящие от квалификации исполнителя; высокая производительность; возможность автоматизации процесса; отсутствие влияния вибрации и шума на исполнителей; лучшее качество поверхности заклепочного шва без местных деформаций обшивки; отсутствие забоин и царапин, которые часто возникают при клепке пневмомолотком.

Для существенного повышения качества изделий и производительности клепальных работ необходима комплексная автоматизация процесса по всем входящим в него операциям. Эта задача решается путем создания и внедрения в производство клепальных автоматов. Соединения, выполненные автоматами, обладают надежными показателями за счет:

- концентрации операций сверления, зенкования, клепки в одной рабочей позиции с использованием единых баз;
- стабильности силы сжатия пакета;
- повышения точности параметров швов;
- снижения влияния субъективных факторов на процесс клепки в связи с улучшением условий труда;
- возможности отказа от направляющих отверстий, что снижает трудоемкость изготовления деталей узлов;
- сокращения трудоемкости работ по установке и снятию технологического крепежа;
- возможности на многих узлах исключать герметизацию, так как автомат обеспечивает герметичность соединения.

Кроме того, значительно снижается стоимость изготовления изделий, т.к. трудоемкость клепки снижается в 1,5...1,7 раза, численность рабочих, занятых на стационарном оборудовании, сокращается на 30...35%, производственные площади уменьшаются на 25...30%.

Цикл работы автомата включает в общем виде следующие элементы:

- выравнивание поверхности изделия относительно оси инструментов;
- сжатие пакета;
- образование отверстия и гнезда под заклепку;
- установку заклепки в отверстие;
- образование замыкающей головки;
- отвод инструментов в исходное положение;
- перемещение изделия или автомата на шаг клепки.

В настоящее время промышленность располагает целым рядом клепальных автоматов и автоматических установок различной мощности и целевого назначения. По этим признакам оборудование может условно подразделяться на три группы мощности, а по технологическим возможностям, связанным с установкой различного вида деталей крепления - на клепку заклепками и клепку стержнями.

Представителями первой (малой) группы мощности с силой расклепывания до 50 кН являются автоматы АК-2,2-0,5; АК-2,2-0,6П; установки УКПА-1; У2,5АК-3,4-0,8. Они предназначены для образования заклепочного соединения в конструкциях легких и средних узлов из алюминиевых сплавов. Автомат АК-2,2-0,5 может устанавливать заклепки с потайной, плоской и полукруглой закладными головками одного типоразмера по диаметру и длине в автоматическом цикле, включающем следующие операции:

- сжатие пакета в зоне клепки;
- сверление или сверление и зенкование отверстий;
- установка заклепки в просверленное отверстие;
- образование плоской замыкающей головки заклепки.

Ко второй (средней) группе мощности с силой расклепывания свыше 50 кН относятся автоматы АК-5,5-2,4; АКЗ-5,5-1,2; установка У18-АКФ-5,5. Эти автоматы выполняют установку в крупногабаритные изделия с использованием цикловой системы автоматики крепежного элемента одного типоразмера по диаметру и длине. Для установки заклепки другого типоразмера требуется переналадка автомата. Автомат АКЗ-5,5-1,2 отличается возможностью осуществлять кроме указанных ранее операций технологического цикла нанесение грунтующе-герметизирующего компонента в просверленное отверстие и зачистку выступающей части закладной головки заклепки. При клепке узлов с большими габаритными размерами

автомат может быть оснащен специальным поддерживающим устройством (ПУ), например, по типу ВУП-6К (рис.3.13).

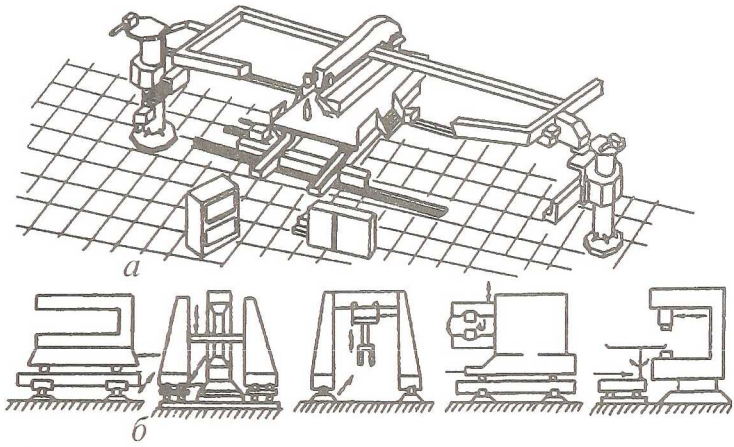


Рис.3.13. Клепальные автоматы:
а автомат АК-5,5-2,4 с выравнивающим устройством ВУП-6; б - схемы позиционирования при клепке

К автоматам третьей группы мощности принадлежат базовые модели АК-16-3 и АКД-16-2. Автоматы могут устанавливать заклепки с потайной и плоской закладной головками, а также стержни-заклепки одного типоразмера по диаметру и длине в автоматическом цикле, включающем:

- перемещение изделия на шаг заклепочного шва;
- выравнивание поверхности изделия в зоне клепки;
- слежение и выдерживание заданной перемычки;
- сверление или сверление и зенкование отверстий с применением смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ);
- нанесение уплотняющих или защитных компонентов на зенкованную часть отверстия;
- установку заклепки или стержня в отверстие;
- образование плоской замыкающей головки заклепки или двух замыкающих головок при клепке стержнями, зачистку выступающей части потайной головки заклепки.

Кроме полного автоматического цикла можно осуществлять отдельные автоматные циклы, включающие один или несколько технологических переходов.Принципиальное отличие автоматов АК-16-3 и АКД-16-2 и компоновок установок с использованием этих моделей в том, что автомат АК-16-3 установлен неподвижно относительно обрабатываемой панели, закрепленной на ложементах ПУ и передвигаемой в пространстве относительно оси клепки. В компоновках установок с использованием автомата АКД-16-2 изделие

устанавливается неподвижно, а силовые головки и весь автомат в целом перемещаются относительно изделия, обеспечивая положение оси клепки по нормали к поверхности панели. Автоматы обеспечивают производительность до 20 заклепок в минуту.

Широкая автоматизация процессов клепки - это комплексная программа, решение которой зависит от разных предприятий, начиная с разработчиков изделия и кончая предприятиями, эксплуатирующими автоматы. Методы выполнения заклепочных соединений повышенного ресурса должны закладываться на стадии эскизного проектирования изделий. В настоящее время большинство конструкций выпускаемых изделий нетехнологично для выполнения соединений в автоматическом режиме. Проектируются они без учета требований к сборочным единицам, подлежащим переводу на автоматическую клепку. В конструкциях клепаных узлов заложена большая номенклатура заклепок. Во многих соединениях в качестве силовых элементов жесткости преобладают профили закрытого типа с разнонаправленным (продольным и поперечным) и двухсторонним расположением. Применяется большое число многослойных пакетов из разнородных материалов с различными механическими свойствами, клиновидные прокладки (дублеры). В результате уровень охвата заклепочных соединений автоматической клепкой низкий.

Проблемами повышения технологичности клепаных конструкций являются:

- унификация профилей с максимальным применением профилей открытого типа;
- унификация заклепок;
- обеспечение постоянного шага заклепок;
- однонаправленное и одностороннее расположение силовых элементов;
- оптимизация схем членения конструкций;
- решение вопроса разметки узлов под автоматическую клепку.

При создании новых изделий должны учитываться технологические возможности автоматического сверлильно-клепального оборудования.

Решение проблем автоматизации конкретных производственных процессов во многом зависит от общего уровня техники, технологии и средств производства. Поэтому достижения в этих областях, как применение станков с ЧПУ и обрабатывающих центров, развитие робототехники и расширение ассортимента вычислительной техники и систем управления, не связанных напрямую с клепально-сборочным производством, могут послужить основой для его дальнейшего развития. Вместе с тем необходимо учитывать, что эти достижения, как правило, обусловлены решением задач общемашиностроительного характера и не могут быть механически перенесены в

специфические условия клепально-сборочного производства, что при постоянном ужесточении требований к качеству выпускаемой техники и улучшению условий труда и определяет высокую интенсивность работ, направленных на его автоматизацию.

В настоящее время в проведении этих работ существует два подхода, один из которых предусматривает частичную, а другой комплексную автоматизацию.

В соответствии с концепцией частичной автоматизации клепально-сборочных работ предусматривается совершенствование оборудования, предназначенного для доклепывания предварительно собранных узлов, при этом собственно процесс сборки и средства его технологического оснащения автоматизации не подлежат. Варианты реализации этого подхода различаются местом, где осуществляется доклепывание. В одних случаях это непосредственно сборочные приспособления, в других - специальные доработочные рабочие места.

Достоинством такого подхода является относительная простота оборудования, однако клепально-сборочное производство по-прежнему остается чрезвычайно немобильным, трудоемким, преимущественно ручным, требующим дорогостоящей и длительной технологической подготовки.

При альтернативном подходе процесс изготовления клепаной конструкции рассматривается как единый объект комплексной автоматизации. Особенностью этого подхода является отказ от специальных сборочных приспособлений (т.е. приспособлений для сборки только одного конкретного узла). Весь процесс сборки и клепки предусматривается осуществлять на универсальном оборудовании (по аналогии со станками с ЧПУ), при этом детали или устанавливаются и удерживаются в сборочном положении роботами-манипуляторами, или вручную устанавливаются на переналаживаемый системой ЧПУ универсальный стол - сборочное приспособление [47].

К достоинствам этого подхода следует отнести высокие производительность, мобильность и гибкость производства, однако его реализация сопряжена с необходимостью решения сложных технических задач.

Необходимо отметить, что оба подхода не исключают использования клепального оборудования на базе прессового принципа. Однако импульсные клепальные автоматы, обладающие высокими энергетическими возможностями, малой массой и в силу этих обстоятельств широкими возможностями встраивания по мобильному принципу, открывают более широкие перспективы. Кроме того, помимо варианта размещения рабочих головок на скобе, без которой автомат прессового типа работать не может, возможен вариант раздельного манипулирования ими с помощью двух роботов, управляемых от одной системы с ЧПУ.

Возможность использования доработочных рабочих мест связана со следующими особенностями конструкции и технологии изготовления клепаной конструкции:

- необходимость обеспечения точности обводов сборочной единицы, взаимного расположения и формы нежестких деталей в совокупности с принятой в производстве ЛА системой увязки геометрических форм и размеров требует использования сборочных приспособлений, в которых осуществляется процесс сборки;
- выбор числа и типа крепежа определяется при проектировании клепаной конструкции, исходя из эксплуатационных нагрузок, которых в производстве она не испытывает. Поэтому в большинстве случаев достаточно выполнить 5...15% соединений, чтобы конструкция приобрела жесткость, достаточную для сохранения своих форм и размеров без помощи сборочного приспособления.

Таким образом, конструкция с частично установленным крепежом может быть вынута из сборочного приспособления и перенесена на доработочное рабочее место, а в освободившемся приспособлении можно собирать следующую сборочную единицу, что является несомненным преимуществом в условиях больших программ выпуска изделий. Использование доработочных рабочих мест не требует изменения конструкции сборочных приспособлений и технологического процесса сборки по сравнению с ручным вариантом.

Импульсные клепальные автоматы в доработочных автоматизированных рабочих местах (ДАРМ) могут использоваться по тем же схемам, что и автоматы прессового типа. В этом случае ДАРМ будет обладать большей производительностью, поскольку малая масса автомата позволяет осуществлять его перемещение с большими скоростями без перегрузки приводов. Однако малые габаритные размеры и масса импульсных автоматов позволяют реализовать и другие, невозможные для автоматов прессового типа, схемы.

Одной из основных особенностей ДАРМ с импульсными автоматами, отличающей их от ДАРМ с автоматами прессового типа, является возможность осуществления более простого принципа управления перемещениями автомата вдоль элементов каркаса клепаных конструкций. Если для ДАРМ с автоматами прессового типа характерно наличие систем обеспечения перемычек, управляющих приводами перемещения автоматов по сигналам датчиков, то в ДАРМ с импульсными автоматами отслеживание перемычек может осуществляться за счет силового взаимодействия головок автоматов непосредственно с каркасом клепаной конструкции. Более того, малая масса автомата при его свободной подвеске позволяет осуществлять перемещение вдоль швов клепаной конструкции путем передачи сил разгона и торможения непосредственно на клепаемую конструкцию.

В качестве примеров рассмотрим ДАРМ для клепки сферических (ДАРМ-КС) и цилиндрических (ДАРМ-КЦ) конструкций.

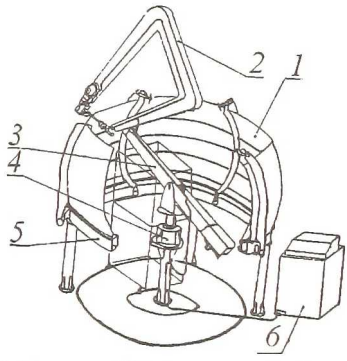


Рис.3.14. Схема доработочного автоматизи-рованного рабочего места для подклепыва-ния конструкции со сферическими обводами (ДАРМ-КС)

ДАРМ-КС (рис.3.14) предназначено для доклепывания предварительно собранных конструкций, имеющих вид шарового сегмента *1* с двумя стыковыми фланцами, один из которых является базовым. Фланцы могут быть наклонены друг к другу, центр сферической поверхности находится между фланцами. Конструкция имеет обшивку, состоящую из нескольких соединенных стыковыми профилями секций, а также силовой набор, состоящий из шпангоутов уголкового и таврового сечения, плоскости которых расположены под различными углами к плоскости базового фланца. В состав ДАРМ-КС входят:

- импульсный клепальный автомат *2*, имеющий вид скобы с расположенными на е консолях рабочими головками;
- позиционер *3*, представляющий собой шарнирно установленную на стойке *4* статически уравновешенную траверсу, на конце которой закрепляется скоба;
- стойка *4*, имеющая устройство регулирования высоты шарнира траверсы для обеспечения его совпадения с центром сферической поверхности объекта клепки;
- стол *5* для крепления объекта клепки базовым фланцем к своей горизонтальной поверхности при обязательном условии совмещения центра сферической поверхности объекта клепки с вертикальной осью стола;
- энергоблок *6* питания силовых точек.

ДАРМ-КС функционирует в полуавтоматическом режиме с участием оператора. который во время клепки находится внутри конструкции объекта клепки, вручную перемещая позиционер с автоматом и подавая команду на срабатывание автомата. Для облегчения вывода автомата в места выполнения соединений рабочая головка, находящаяся со стороны каркаса, снабжена копировальным щупом-вилкой с регулируемым относительно оси рабочей головки положением.

Процесс клепки осуществляется следующим образом.

Оператор накидывает щуп-вилку *3* на свободную полку профиля *4* и регулирует положение рабочей головки *1* относительно щу-

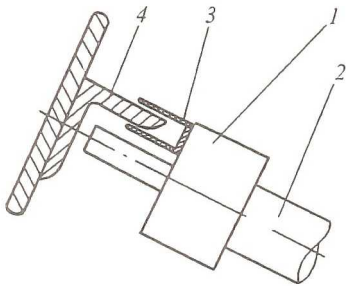


Рис.3.15. Схема обеспечения перемычки от края отверстия до края детали в ДАРМ-КС

па (рис.3.15), задавая тем самым величину перемычки от края отверстия под заклепку до края привалочной полки профиля. После такой регулировки автомат имеет возможность перемещаться только вдоль профиля, отслеживая все особенности его формы и положения в пространстве путем покачивания и поворота траверсы *2* в сферическом шарнире.

При относительно нежестких требованиях к точности шага заклепок в шве перемещения автомата вдоль профиля может осуществлять оператор, а для повышения стабильности шага следует использовать механизм, "шагающий" по профилю рядом со щупом-вилкой и подтягивающий автомат от одного места выполнения соединения к другому.

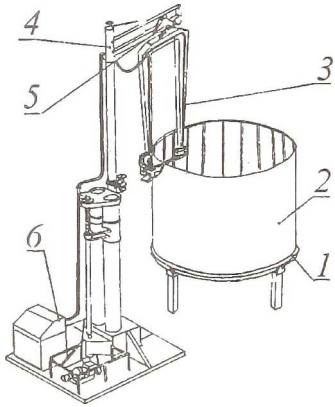


Рис.3.16. Схема доработочного автома-тизированного рабочего места для доклепывания цилиндрических конст-рукций (ДАРМ-КЦ)

ДАРМ-КЦ (рис.3.16) предназначено для доклепывания предварительно собранных цилиндрических конструкций, имеющих обшивку и силовой набор, состоящий из шпангоутов и стрингеров уголкового, таврового и зетобразного сечения. В состав ДАРМ-КЦ входят:

- поворотный стол *1*, предназначенный для базирования объектов клепки *2* по базовой плоскости торцевого шпангоута с обеспечением соосности вертикальной оси вращения стола и оси объекта клепки, для вращения объекта клепки вокруг его оси с фиксацией в любом положении и возможностью поворота на фиксированный шаг, а также для обеспечения вертикальности образующих цилиндрических поверхностей объектов клепки;
- импульсный клепальный автомат *3*, подвешенный за скобу рабочими головками вниз, причем ось рабочих головок автомата занимает горизонтальное положение, а перпендикулярная к ней ось скобы, лежащая в е□ плоскости и проходящая через центр масс и точку подвеса - вертикальное;

- позиционер *4*, удерживающий скобу в подвешенном положении, может осуществлять вертикальные перемещения узла подвески автомата, а также отвод его в сторону;
- узел подвески *5* автомата, обеспечивающий качание скобы относительно вертикального уравновешенного положения в любом направлении.

Процесс клепки осуществляется следующим образом. Базирование объекта клепки на поворотном столе производится при отведенном в сторону автомате для исключения взаимных повреждений. Затем автомат выводят в положение, при котором ось его рабочих головок проходит через ось поворотного стола, причем во избежание удара по объекту клепки автомат поднимают в верхнее положение. При опускании автомата погрешности диаметров объектов, а также несоосная установка на поворотный стол *1* компенсируются качанием автомата в узле подвески. Оператор с помощью пульта управления *6* приводит всю систему в исходное положение, при котором ось автомата совмещается с осью первого будущего заклепочного соединения. При этом производится вращение стола и вертикальные перемещения автомата. Затем осуществляется клепка по программе, причем отклонения плоскостей шпангоутов не отслеживаются, а отслеживание положения стрингеров осуществляется по принципу, описанному ранее.

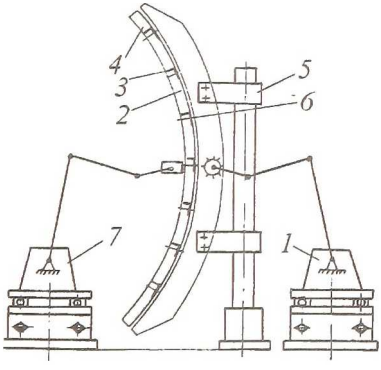


Рис.3.17. Схема клепки панели двумя роботами:
1 - робот с многоинструментальной головкой; 2 - обшивка; 3 - стрингер; 4 - шпангоут; 5 устройство базирования объекта клепки; 6 - заклепка; 7 - робот с поддержкой

Рассмотренные ДАРМ-КС и ДАРМ-КЦ являются примерами специализированных устройств, предназначенных для доклепывания однотипных конструкций, что не всегда выгодного при небольших программах выпуска изделий. Более высокий уровень универсальности может быть обеспечен при использовании промышленных роботов (рис.3.17.). В этом случае ДАРМ представляет собой совокупность устройства крепления объекта клепки в заданном положении с двумя кинематическими независимыми роботами, каждый из которых несет рабочую головку. Согласованная работа промышленных роботов обеспечивается управлением от единой системы ЧПУ. Преимуществами таких ДАРМ является высокие универсальность, мобильность и производительность, однако резкое осложнение задач управления в условиях наличия погреш-

ностей форм и расположения деталей может оказаться серьезным препятствием на пути использования промышленных роботов при клепке. Наиболее перспективными направлениями развития ДАРМ этого типа являются повышение точности сборки и усложнение функций систем управления.

3.5. Специальные виды клепки

Кроме обычных стержневых заклепок в производстве ЛА применяются заклепки специальные. В элементах конструкции, испытывающих большие срезывающие силы, применяют заклепки с высоким сопротивлением срезу и болт-заклепки. При одностороннем подходе в зону клепки применяют заклепки с сердечником, заклепки с высоким сопротивлением срезу для односторонней клепки и гайки-пистоны. Для клепки и установки каждого вида специальных заклепок применяют соответствующие инструменты и оборудование.

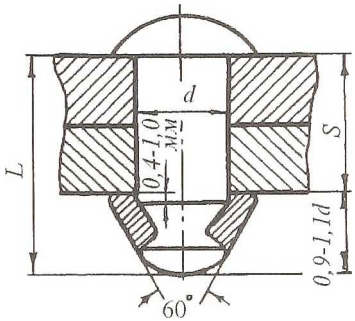


Рис.3.18. Размеры заклепки с высоким сопротивлением срезу

Заклепка с высоким сопротивлением срезу состоит из двух элементов стержня и кольца. С одной стороны стержень имеет закладную головку, а с другой - специальную канавку (рис.3.18).

После вставки заклепки в отверстие цилиндрическая часть стержня заклепки должна выступать из пакета на 0,3...1,2 мм, что обеспечивает требуемые форму и размеры замыкающей головки. Замыкающую головку заклепки изготавливают из кольца специальным инструментом-обжимкой. Размеры замыкающей головки определяются размерами и формой рабочей части обжимки, которую изготавливают для каждого типоразмера заклепки [29].

Технологический процесс установки таких заклепок состоит из следующих операций: образование отверстия под заклепку, установка заклепки *2* в отверстие, надевание кольца *3*, образование замыкающей головки *7*, контроль качества шва (рис.3.19).

Качество поставленных заклепок проверяют визуально. На головках заклепок не должно быть трещин и форма замыкающих головок должна соответствовать ТУ.

Отверстие в соединяемом пакете *1* получают сверлением с последующим протягиванием (или развертыванием) и упрочнением путем дорнирования или раскатывания. Заклепку вставляют в отверстие и на выступающую часть стержня вручную надевают кольцо. Для образования замыкающей головки и сжатия пакета применяют прес-

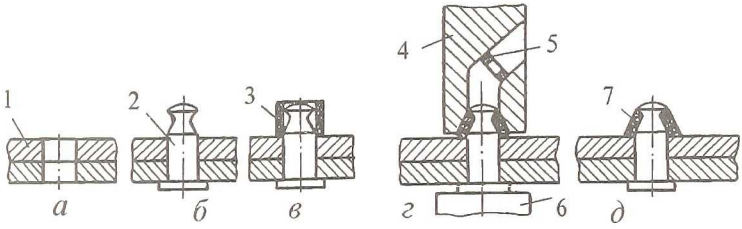


Рис.3.19. Схема процесса установки стержневой высокопрочной заклепки:
а - образование отверстия; б - вставка заклепки; в - надевание кольца; г - образование замыкающей головки; д - заклепка в законченном виде

сы одиночной клепки или пневматические молотки. Для получения замыкающей головки требуемой формы и размеров применяют специальную обжимку *4* и поддержку *6*. При деформировании часть материала кольца заполняет канавку в стержне заклепки, а лишний материал *5* срезается и выпадает через отверстие в обжимке.

Болт-заклепка состоит также из двух частей: стержня с закладной головкой и обжимного кольца (рис.3.20). Стержень имеет несколько кольцевых проточек, одна из которых имеет глубину большую, чем все остальные. Эта проточка делит стержень болт-заклепки на две части:

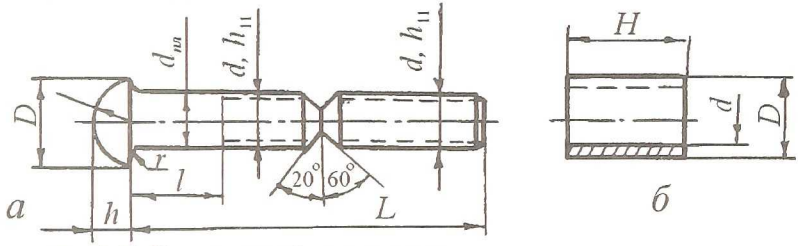


Рис.3.20. Конструкция болт-заклепки:
а - стержень; б - втулка (обжимное кольцо)

- от закладной головки до проточки, остающуюся в конструкции после расклепывания;
- от проточки и до конца стержня - технологическую часть, удаляемую в процессе расклепывания.

Установка для расклепывания болт-заклепки состоит из переносного гидравлического пресса и пневмогидравлического агрегата. Схема операция постановки болт-заклепки приведена на рис.3.21.

Процесс установки болт-заклепки происходит следующим образом (см. рис.3.21). В отверстие пакета *1* вставляется стержень болт-заклепки *2*, а на него одевается втулка *3*. Затем хвостовик *5* болт-заклепки вставляется в гидропресс *4*, где происходит захват его кулачками *6*. Установка готова к работе.

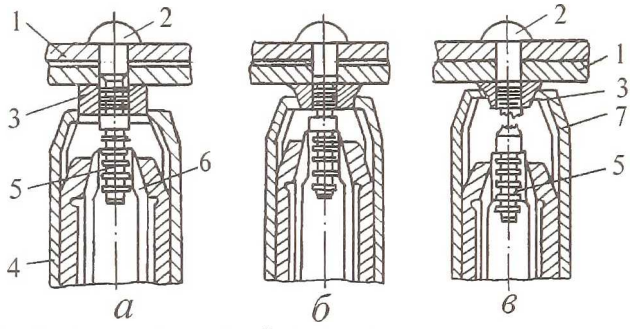


Рис.3.21. Схема операции постановки болт-заклепки:
а - исходное положение; б - начало рабочего хода; в - окончание рабочего хода

Фильера 7 обжимает втулку *3* заклепки и при этом отрывается технологическая часть *6* стержня заклепки. Процесс клепки окончен.

Заклепка с сердечником применяется для односторонней клепки и состоит из двух частей пистона и сердечника. Пистон выполнен в виде стержня с центрально расположенным отверстием. Внутрь пистона вставлен сердечник, который представляет собой ступенчатый стержень, заканчивающийся захватной и замыкающей головками (рис.3.22). Со стороны замыкающей головки стержень имеет утолщение, а со стороны захватной головки - кольцевую проточку - шейку, по которой сердечник разрывается в момент окончания клепки.

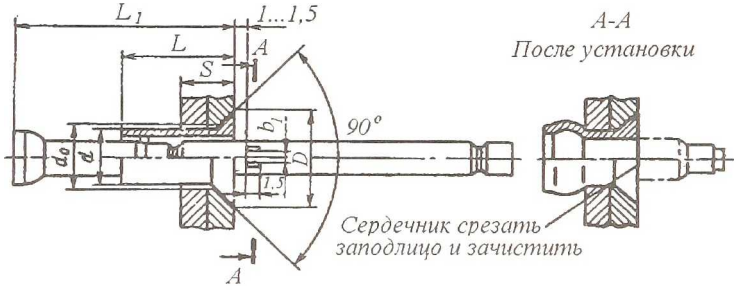


Рис.3.22. Заклепка с сердечником

Технологический процесс установки заклепки с сердечником включает следующие операции (см. рис.3.23): образование отверстия под заклепку; установка заклепки в захваты пресса *2* и отверстие; образование замыкающей головки; обрыв сердечника; удаление выступающей части сердечника; зачистка сердечника; контроль качества соединения.

Отверстия под заклепку выполняются теми же инструментами и оборудованием, что и отверстия под обычные стержневые заклепки. Заклепки устанавливают с помощью специального гидравлического или пневматического переносного пресса ПС-52Г Пресс со

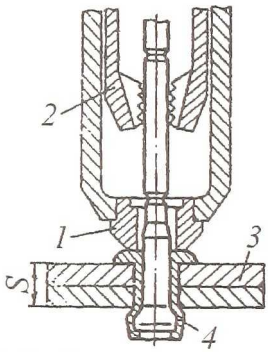


Рис.3.23. Постановка заклепки с сердечником

вставленной заклепкой плотно прижимают наконечником *1* к поверхности детали *3* в таком положении, чтобы закладная головка заклепки плотно прилегала к детали по всей окружности. Замыкающая головка заклепки образуется при включении пресса в работу. Под действием системы рычагов захват пресса *2* перемещается и протягивает стержень заклепки через пистон *4*, образуя при этом замыкающую головку. После обрыва часть его остается внутри пистона, а часть выступает над поверхностью замыкающей головки на 5...10 мм. Выступающую часть сердечника удаляют кусачками и зачищают фрезерованием.

Контроль качества соединения производится пооперационно в процессе выполнения соединения и контроль размеров и формы головки заклепки - после их установки.

Заклепки с высоким сопротивлением срезу для односторонней клепки состоят из корпуса, винта и кольца (рис.3.24). Корпус изготавливают из 30ХГСА с термообработкой до σ_B=1,2·10^7 Па, отверстие в корпусе имеет левую резьбу. Закладная головка корпуса выполнена в виде шестигранника или конуса с углом 90° или 120°.

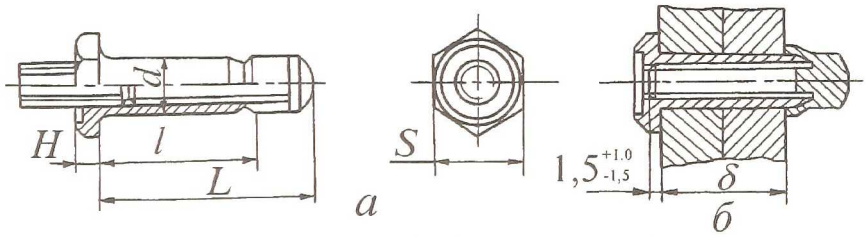


Рис.3.24. Конструкция заклепки с высоким сопротивлением срезу:
а - с шестигранной закладной головкой; б - соединение, выполненное заклепками с высоким сопротивлением срезу

При установке заклепки в конструкцию инструмент фиксирует положение корпуса по шестиграннику или шлицам в головке заклепки и предотвращает поворот корпуса. Винт из 30ХГСА имеет головку и стержень с левой резьбой. На стержне имеется выточка, по которой он обрывается в процессе клепки. На свободном конце стержня за выточкой имеются лыски, по которым стержень фиксируется от провертывания в процессе клепки. Кольцо изготавливают из стали Х18Н10Т, наружный диаметр его соответствует диаметру корпуса заклепки, внутренний - наружному диаметру резьбы винта.

Диаметры отверстий в деталях под заклепки с высоким сопротивлением срезу $d_0=(d+0,05)^{+0,12}$, где d диаметр корпуса заклепки. В процессе установки заклепки стержень затягивают до отрыва хвостовика винта. К моменту отрыва хвостовика из кольца образуется замыкающая головка требуемого размера.

Заклепки в конструкцию устанавливают с помощью пневматических гайковертов со специальным комплектом наконечников для заклепок с различной формой закладных головок.

Порядок постановки заклепки с высоким сопротивлением срезу с односторонним подходом показан на рис.3.25.

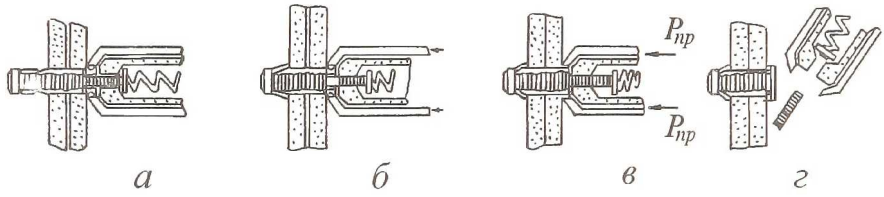


Рис.3.25. Порядок постановки заклепки с высоким сопротивлением срезу с односторонним подходом:

а установка заклепки в отверстие и надевание наконечника на винт заклепки (исход-ное положение); б - ввинчивание винта в наконечник, промежуточная осадка втулки замыкающей головки; в - окончательное формирование замыкающей головки; г - разрушение винта по ослабленному сечению, выталкивание технологической части винта

Гайка-пистон (рис.3.26) имеет отверстие, которое на половине своей длины имеет резьбу. Остальная часть отверстия со стороны закладной головки выполнена без резьбы и имеет несколько больший диаметр. Пистон *1* вставляют в отверстие, в резьбу ввертывают наконечник инструмента *2* и осаживают пистон. При этом образуется "замыкающая" головка *3*, а затем наконечник инструмента вывинчивают.

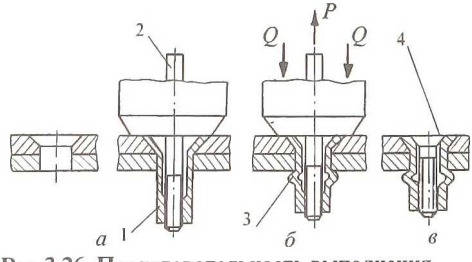


Рис.3.26. Последовательность выполнения операций постановки гайки-пистона:

а - исходное положение; б - рабочий ход; в - соединение, образованное гайкой-пистоном

В отверстие гайки-пистона ввертывают винт 4, который повышает прочность такой заклепки и исключает возможность попадания внутрь конструкции грязи и влаги. Длина гайки-пистона определяется из условия: $L=S+1,8$ для заклепки диаметром 5 мм; $L=S+1,5$ для заклепки диаметром 6 мм; S толщина, мм. Длина винта принимается на 2 мм короче длины гайки-пистона.

Для установки заклепок типа гайка-пистон применяются специальные пневматические гайковерты типа ИОК-ГП2, ИОК-ВС1, а также специальные ручные рычажные клещи.

Постановка гаек-пистонов осуществляется следующим образом. В тисках закрепляется пакет с заранее просверленными отверстиями. Размеры отверстий больше диаметра заклепки на 0,1...0,2 мм. Подбирается длина заклепки гайки-пистона соответственно собираемому пакету. Пистон навертывается на наконечник (винт) пресса ИОК-ГП2 и вставляется в отверстие пакета (рис.3.26, а). Расклепывается заклепка. Требуемые размеры замыкающей головки получают регулированием хода наконечника. Вворачивается винт 4.

Для предохранения винта от вывертывания из пистона резьбу винта перед установкой его в пистон смазывают карбинольным клеем.

3.6. Болтовые соединения

Болтовые соединения в конструкциях современных ЛА из алюминиевых сплавов, титана и композиционных материалов являются одним из наиболее широко применяемых видов механических точных соединений. Объясняется это большим опытом выполнения таких соединений, их достаточно хорошей изученностью, надежными методами расчетов, технологией выполнения. В конструкциях тяжелых самолетов их число достигает 150...200 тыс. штук. Более широко применяются болтовые соединения в ракетостроении. При этом болтовые соединения отличаются не только по диаметру болтов (рис.3.27), толщине и составу соединяемого пакета, но и по ряду конструктивных признаков (рис.3.28). Различия в конструктивном исполнении болтовых соединений, передающих нагрузку от одного соединяемого элемента к другому (рис.3.29), а также различия в характере передаваемой нагрузки статическая (растяжения, среза), циклическая требуют различных технологических решений при выполнении соединений.

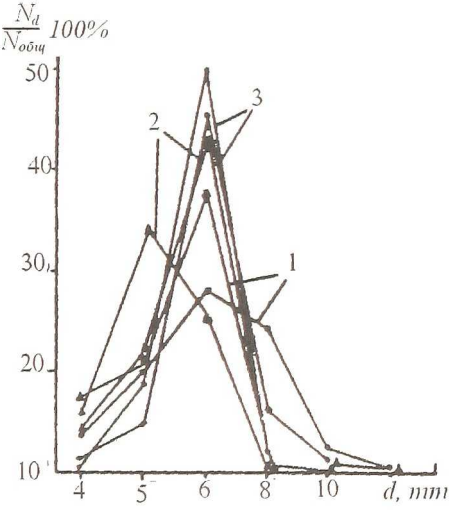


Рис.3.27. Распределение болтов в конструкции планера по диаметрам:
1 для тяжелых самолетов; 2 для средних; 3 - для легких

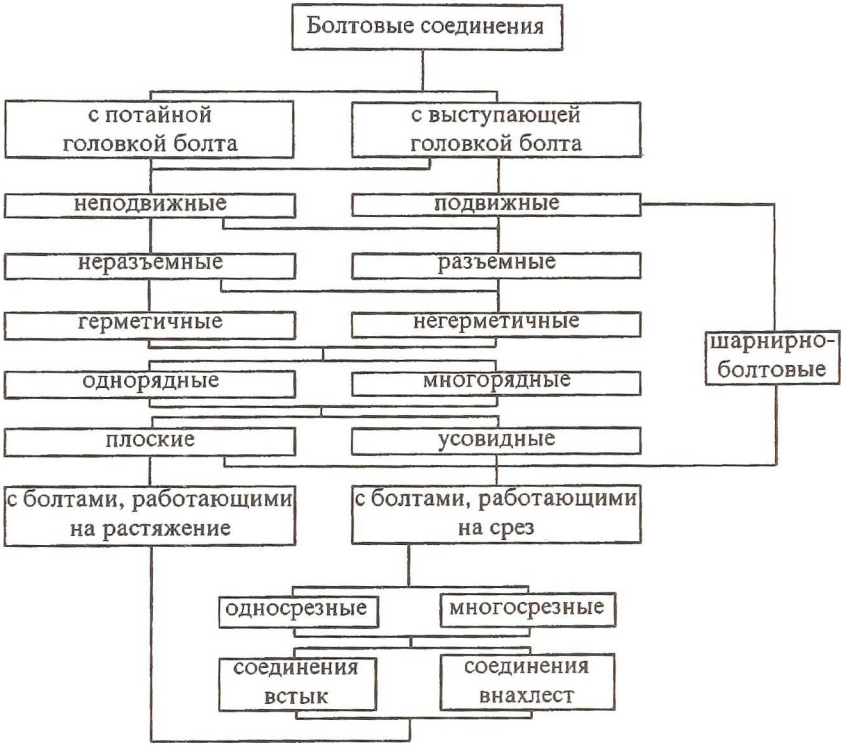


Рис.3.28. Классификация болтовых соединений

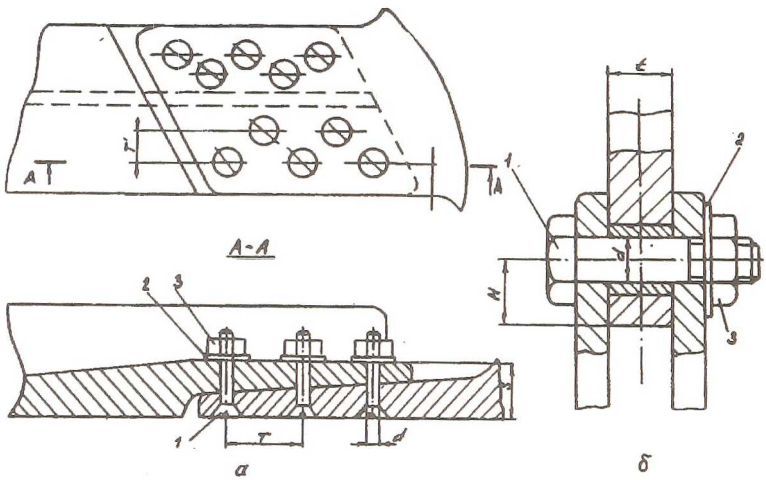


Рис.3.29. Конструктивное исполнение болтовых соединений:
а - неподвижное; б - шарнирно-болтовое; 1 - болт; 2 - шайба; 3 - гайка

Различия эти состоят в совокупности тех конструктивно - технологических мероприятий, которые необходимо выполнить для обеспечения высокой надежности соединения (рис.3.30).

Рис.3.30. Классификация факторов, определяющих ресурс заклепочных и болтовых соединений

Анализ приведенной классификации мер конструктивного характера показывает, что все они сопряжены с повышением массы конструкции планера. Поэтому при создании высокоресурсных болтовых соединений широкое применение находят технологические методы повышение циклической долговечности. К ним относятся специальные технологии по созданию высокого радиального и осевого натяга при постановки болтов и навинчивании гаек, а также технологические операции упрочняющей обработки зон крепежной точки, направленные на создание необходимого напряженно - деформированного состояния в соединении. Такими технологическими операциями являются: упрочняющая обработка переходных зон под галтель болта (рис.3.31), раскатывание (рис.3.32, а) или дорнование (рис.3.32, б) отверстий проталкиванием через них или промежуточный элемент, установленный в отверстие, специально спрофилированного инструмента - дорна, а также дробеструйная обработка (рис.3.32, в). При этом металл на стенках отверстия подвергается пластическому деформированию, и в поверхностном слое его формируются остаточные напряжения сжатия. Исследованы и рекомендованы к применению и такие методы создания благоприятного напряженно - деформированного состояния, как обработка зон отверстия под болт методами глубокого пластического деформирования (см. рис.3.31). Их суть заключается в обжатии зон, прилегающих к концентратору напряжений, с помощью специальных оправок.

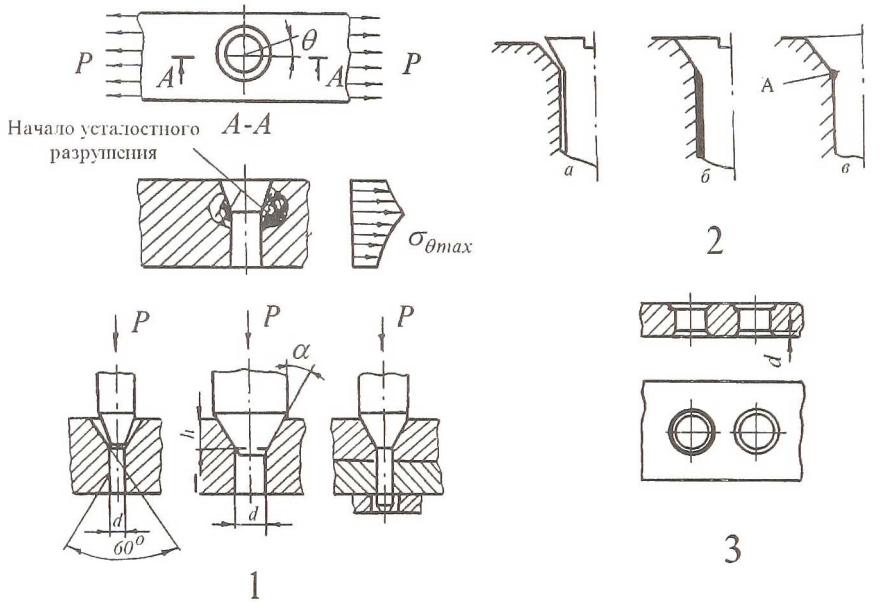


Рис.3.31. Упрочняющая обработка местным глубоким пластическим деформированием: 1 - специальной оправкой; 2 - головкой болта; 3 - обжатием кромок отверстия

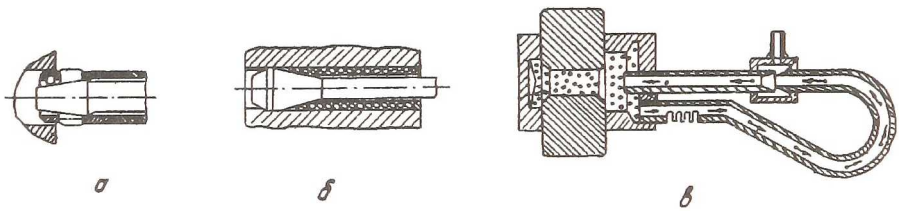


Рис.3.32. Технологические процессы упрочнения конструкций поверхностным пластичес-ким деформированием (ППД):
а - раскатывание; б - дорнование; в - дробеструйная обработка

Сборку болтовых соединений производят в следующей последовательности: сначала наворачивают все гайки, затем легко затягивают их и наконец делают полную затяжку. Сила затяжки может быть отрегулирована с помощью специальных ключей: динамометрических или предельных. Предельные ключи включаются при достижении определенного, заранее заданного момента затяжки. На динамометрических ключах есть указатель значения прилагаемого момента.

В конструкциях ЛА большое распространение получили анкерные гайки, которые приклепываются внутри конструкции, что позволяет устанавливать болты без непосредственного доступа к гайке.

В резьбовых соединениях возможно самоотвинчивание гайки. Чтобы избежать этого, применяют средства стопорения. Отметим

некоторые из них: стопорение контргайкой, разводными шплинтами, проволокой, упругой (пружиной) шайбой, деформируемыми (стопорными) шайбами, посредством местной пластической деформации, стопорение путем увеличения сил трения в резьбе.

3.7. Комбинированные соединения

В производстве ЛА находят широкое применение комбинированные соединения.

Примерами комбинированных соединений могут служить швы, в которых имеются болты и заклепки, заклепки и сварные точки, заклепки и клей, заклепки из различных материалов и т.д.

Наиболее часто применяются клепано-клеевые соединения, особенно в тех случаях, когда к соединению предъявляется требование по герметичности или повышенные требования по жесткости и выносливости. В конструктивном отношении такие швы выполняются как и клепаные, с той лишь разницей, что между соединенными деталями вводится слой клея.

Технологический процесс выполнения клепано-клеевого соединения содержит следующие операции:

- предварительная сборка изделий и фиксация деталей в сборочном положении;
- сверление отверстий и зенкование гнезд под потайные головки заклепок;
- разборка изделия;
- удаление заусенцев, стружки и пыли;
- обезжиривание поверхности под нанесение клея;
- нанесение клея и открытая выдержка;
- окончательная сборка изделия и фиксация деталей в сборочном положении;
- клепка;
- контроль.

Данный технологический процесс применим при использовании клеев холодного отверждения типа ВК-5. Этот клей обладает хорошей текучестью, не требует высокой точности пригонки деталей и нагрева конструкции для отверждения клея [29, 70]. Для получения клепано-клеевых соединений используют также клеи горячего отверждения, к ним относятся ВК-3, БФ-2.

Кроме жидких клеев существуют и клеи, например, БФ-4 и ВК-3 в виде пленки. Технологический процесс выполнения соединений с использованием этих клеев включает дополнительно операцию термовыдержки. Температура отверждения таких клеев 150...165°С. В тех случаях, когда для материалов заклепок устанавливаемых в шов, не допускается нагрев до температуры отверждения клея, сначала

производится склеивание деталей, а потом образование отверстий под заклепки и клепка.

Если комбинированное соединение состоит из заклепок и болтов, разрушение их при нагружении соединения на срез происходит неравномерно. Жесткость соединения (сдвиги в шве) зависит от материала входящих в шов заклепок и болтов и характера их посадки в отверстие.

Чем больше разница в пластических свойствах материала силовых точек и характере их посадки в шов, тем больше потеря в прочности.

Прочность соединения снижается по сравнению с расчетной и при несоблюдении технологического процесса установки в шов болтов. В случае различной посадки болтов в обычном некомбинированном шве при нагружении шва болты неодновременно включаются в работу, и прочность соединения будет меньше, чем при одинаковой посадке болтов. Такое соединение будет соответствовать состоянию, свойственному комбинированному шву. При выполнении соединений принимают все меры для обеспечения одинаковой технологии образования отверстий, одинаковой степени посадки и затяжки болтов.

Комбинированные соединения из болтов и заклепок, заклепок различных типов, заклепок из различных материалов выполняют теми же инструментами, оснасткой и оборудованием, что и при обычной клепке. Последовательность установки болтов и заклепок в этом случае определяют исходя из конструкции изделия и вида оборудования.

Соединения, имеющие в одном шве сварные точки и заклепки, выполняют с помощью универсального клепального и сварочного оборудования. Как правило, в таких соединениях вначале устанавливают заклепки, а затем производят точечную сварку.

3.8. Герметизация заклепочных и болтовых соединений

Герметизацию применяют для поддержания избыточного давления в кабинах, предотвращения утечки топлива из отсеков, используемых как емкости, защиты отсеков и агрегатов от проникновения в них газов, влаги и агрессивных жидкостей. Утечка воздуха, газов или жидкостей обычно происходит через зазоры в соединениях, между контактными поверхностями листов, стержнем и головкой заклепок и стенками отверстий [29, 70, 72] (рис.3.33, а). Постановка вместо обычных заклепок заклепок с компенсатором приводит к значительному повышению герметичности швов. Наибольший эффект в части герметизации швов достигается сочетанием плотной посадки заклепок с последующим нанесением герметизирующих материалов.

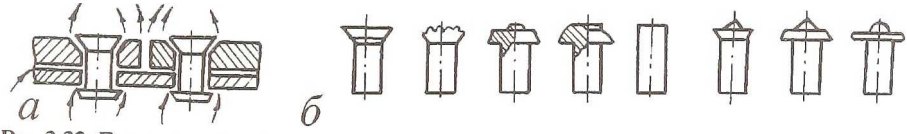


Рис.3.33. Герметичная клепка:
а место утечки; б типы заклепок для получения плотнопрочного шва без герметизирующих материалов

При постановке обычных заклепок плотная посадка может быть получена за счет нанесения слоя герметика на поверхность заклепки (рис.3.34, а), установкой резиновых колец (рис.3.34, б) и металлических втулок (рис.3.34, в), а так же за счет конусности стержня (рис.3.34, г), применения заклепок с уплотнительным пояском (рис.3.34, е). Получение натяга и плотного соединения возможно при клепке с образованием потайной головки заклепки (рис.3.34, д).

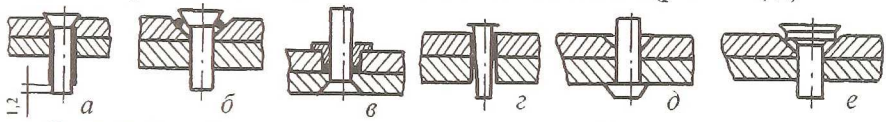


Рис.3.34. Способы устранения утечек между заклепкой и стыками отверстий

Для герметизации клепаных и болтовых швов применяют упругие прокладки и специальные герметики. Упругие прокладки из металла, резины, асбеста, пластмасс не имеют адгезии - сцепления с поверхностями соединяемых деталей и проявляют свои герметизирующие свойства только в момент действия сил от заклепок или болтов. В случае ослабления силы сжатия на прокладку от болтов или заклепок эффект герметизации пропадает.

Герметизирующие материалы имеют адгезию к соединяемым деталям и могут применяться в виде пленок, паст и жидкостей, допускают взаимное перемещение соединяемых деталей без нарушения герметизации. Они обладают пластичностью, имеют сцепление не менее 0,98 МПа с поверхностями деталей, которое не должно нарушаться при воздействии статических и переменных нагрузок, различных температур, атмосферных явлений и воздуха; газов или топлива. Герметики не должны оказывать вредного воздействия на людей и вызывать коррозионные процессы в зоне герметизации.

В производстве ЛА применяется большое число разнообразных герметиков. Наиболее распространены ВГФ-1 и У-2-28, работающие при температурах от -60 (70) до +250 (300) °С. Они могут быть в виде пастообразной массы или жидкости и наноситься на поверхность деталей шприцем, пульверизатором или кистью. Имеются и другие виды герметиков: УТ-32, ВУР и т.д. Герметик У-20А применяется в виде лент и жгутов.

Ленты из герметизирующего материала или ткани, пропитанной герметиком, нарезают по ширине шва с припуском 15 мм на

сторону и укладывают в зону шва вручную. Герметики в виде пасты наносят шпателем или шприцем. Герметики, наносимые кистью, разводят до состояния вязко-текучей жидкости. На чертеже герметичного шва указывают марку герметика, зону герметизации и число слоев герметика, наносимого кистью. Возможно нанесение герметика поливом или пульверизатором. После нанесения каждого слоя герметика кистью, пульверизатором или поливом дают вдержку для вулканизации - отверждения герметика. Важным свойством герметика является его жизнеспособность, т.е. время, в течение которого герметик наносится на поверхности деталей, сохраняя свои адгезионные свойства способность прилипать к поверхностям деталей. По истечении определенного срока герметик теряет эти свойства и в дальнейшем не может быть использован. Учитывая жизнеспособность герметика, приготавливают его непосредственно в цехе герметизации перед выдачей на рабочие места.

Герметизация клепаного шва осуществляется одним из следующих способов: внутришовной герметизацией, при которой герметики прокладываются между соединенными деталями; поверхностной герметизацией, когда герметик наносится на внутренние поверхности соединяемых деталей; смешанной герметизацией, включающей внутришовную и поверхностную (рис.3.35).

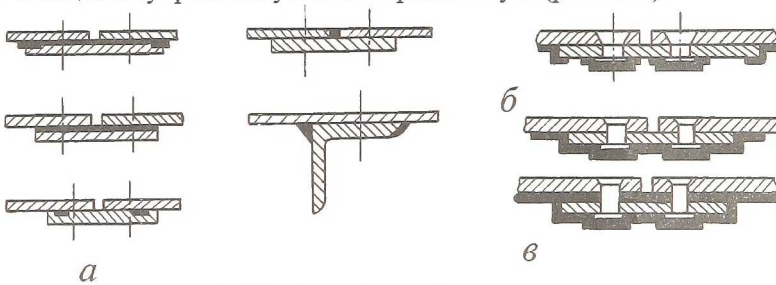


Рис.3.35. Способы герметизации клепальных швов:
а - внутришовная; б - поверхностная; в - смешанная

При **внутришовной герметизации** между деталями прокладываются жгуты или пленки из герметизирующего материала или в специальные канавки (пазы), профрезерованные в одной из деталей, вводят герметик (рис.3.35, а). При прокладывании между деталями жгутов и пленок процесс герметизации совмещается с процессом сборки и клепки изделия. В этом случае изделие предварительно собирают на контрольные болты, затем разбирают, зачищают заусенцы, обезжиривают поверхности, наносят пленку, а затем окончательно собирают изделие и производят клепку. В случае прокладки герметика в канавках процесс герметизации значительно упрощается. При сборке контактные поверхности деталей обезжиривают, детали собирают и соединяют заклепками и через отверстие вводят в канавки герметик, после чего заглушают пробкой.

Поверхностная герметизация нанесение на внешние поверхности собранного изделия пастообразных и разжиженных герметиков может быть местной или общей. В случае местной герметизации герметик наносят в зоне стыка листов по пограничным швам или вокруг головок заклепок и болтов. При общей поверхностной герметизации все поверхности детали покрывают герметиком со сторон рабочей среды (рис.3.35). Изделие, в котором имеются герметичные клепаные или болтовые швы, собирают и клепают в обычных производственных условиях и собранное изделие передают на участок герметизации, где созданы необходимые для этого условия.

Смешанный способ герметизации является наиболее трудоемким и дорогим и применяется главным образом при изготовлении емкостей для топлива, к которым предъявляются повышенные требования по герметизации.

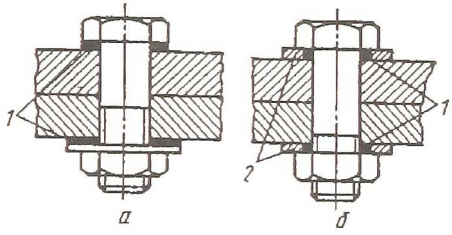


Рис.3.36. Герметизация болтовых соединений: 1 - уплотнитель; 2 - шайбы с проточками

Герметизация болтовых соединений производится аналогично заклепочным. Степень герметизации разъемного болтового соединения зависит от посадки болта в отверстии и определяемых этой посадкой зазоров. Зазор можно уменьшить с помощью уплотнительной пленки (рис.3.36, а) или уплотнительными прокладками, которые располагаются на поверхности шайб (рис.3.36, б) или в специальных выточках. Анкерные гайки герметизируют с помощью уплотнительных колец, помещаемых в канавки, расположенные на винте или корпусе гайки [72]. Выбор того или иного способа герметизации зависит от вида конструкции, ее назначения и требований, предъявляемых к данному изделию.

Сборка герметичных конструкций усложняет технологический процесс производства. Надежность герметичных отсеков и агрегатов повышается при применении, где возможно, монолитных панелей и узлов, уменьшении числа "разъемов" в самом герметизируемом изделии.

3.9. Технологический процесс сборки агрегатов клепаной конструкции

Исходными данными для проектирования технологических процессов сборки являются рабочие чертежи узла (агрегата), технические условия на их изготовление, программа выпуска.

Рабочие чертежи включают общий вид узла, секции или агрегата, необходимые сечения и стыковые элементы.

Технические условия на изготовление объекта состоят из сведений о точности, степени сборочной законченности, возможных отклонениях от чертежа, требованиях контроля, испытаний, защите от коррозии и других.

Производственная программа оказывает влияние на характер технологического членения агрегатов ЛА, схему и методы сборки, глубину разработки рабочей технологии, степень механизации производственных процессов, их оснащенность специальным оборудованием и сборочной оснасткой, а также на организационные формы производственного процесса.

На производстве к исходным данным относятся также директивные технологические материалы. Директивные технологические материалы разрабатывают в ОКБ в период проектирования и изготовления опытного образца, они являются основой для подготовки производства и содержат схемы конструктивных и технологических разъемов, схемы увязки штамповой и сборочной оснастки, схемы сборки агрегатов, перечень средств, обеспечивающих взаимозаменяемость узлов, панелей, агрегатов и их секций, перечень и краткие характеристики новых технологических процессов, подлежащих освоению, ведомости специального оборудования [25].

При разработке технологического процесса сборки необходимо установить план и содержание сборочных операций, входящие в них переходы и наиболее рациональную последовательность их выполнения. В зависимости от технологичности изделия и производственной программы необходимо всемерно механизировать основные и вспомогательные процессы, исключая или сводя к минимуму подгоночные и трудоемкие ручные работы. Вместе с разработкой технологических процессов сборки составляют условия на проектирование сборочной оснастки и средств контроля, выбирают транспортные и подъемные устройства, составляют условия поставки на сборку узлов и деталей и ведомости потребных нормалей и материалов.

Условия на поставку деталей и узлов разрабатываются технологами агрегатных цехов и определяют ту степень законченности, с какой должны поступать детали и отдельные узлы в данный агрегатный цех на сборку конкретной сборочной единицы. В условиях поставки указывают укомплектованность узла, перечисляют детали, входящие в его конструкцию. В условиях на поставку деталей определяется степень их готовности, т.е. указывается наличие припусков, технологических отверстий, оговариваются места, где их не должно быть.

Технологический процесс оформляется на операционных картах установленного образца, производится нормирование процесса. В качестве примера рассмотрим технологический процесс сборки шпангоута (рис.3.37), состоящего из стенок (*1*, *2*, *3*), наружного *4* и внутреннего *5* поясов, профилей

жесткости *6* и накладок *7* для соединения стенок и поясов. Требуемая точность по наружному контуру шпангоута ±1 мм на сторону.

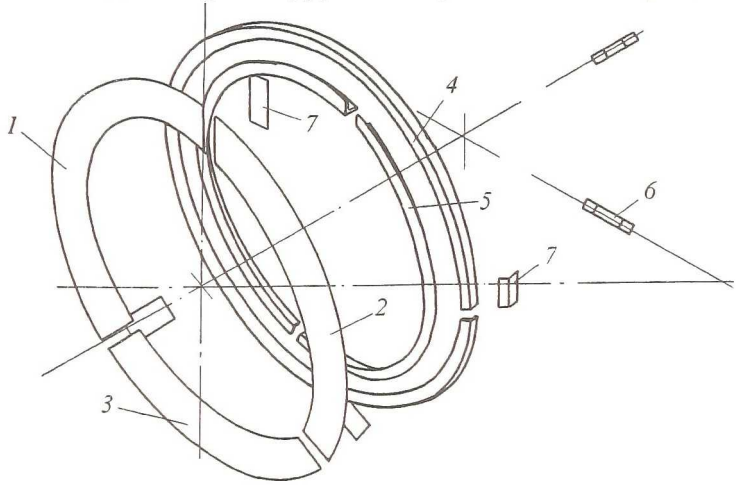


Рис.3.37. Шпангоут

При сборке приняты следующие базы. Образование наружного контура агрегата осуществляется по поверхности каркаса, так как шпангоут в собранном виде будет подаваться на сборку отсека. Стенка шпангоута при сборке устанавливается по опорным элементам приспособления и установочным базовым отверстиям (УБО), выполненным в приспособлении и стенке. Внешние поверхности поясов базируются по опорным поверхностям фиксаторов приспособления (рис.3.38), а элементы жесткости (стойки) устанавливаются по сборочным отверстиям (СО) в стенках и стойках. Стенки шпангоута поступают на сборку без припусков с УБО и СО под стойки.

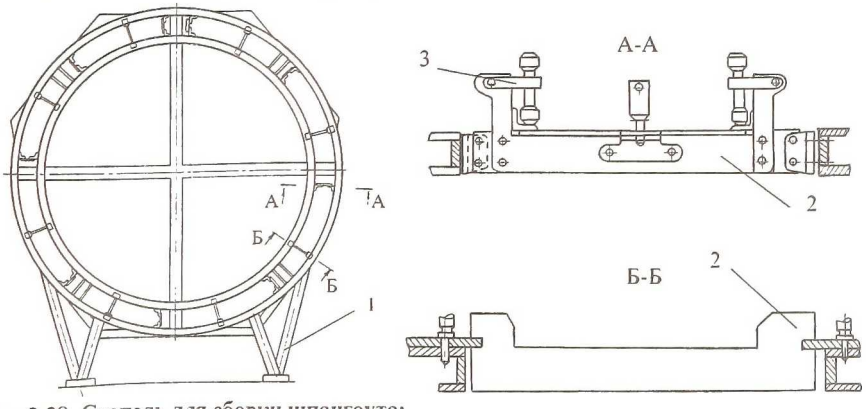


Рис.3.38. Стапель для сборки шпангоута:
1 - рама; 2 - ложементы; 3 - прижимы

Наружные и внутренние пояса поступают на сборку окончательно обработанными с припуском по длине 10 мм.

Стойки поступают со СО в законченном виде. Стыковые накладки имеют направляющие отверстия (НО).

Сборку шпангоута проводят следующим образом:

- устанавливают стенки *1*, *2*, *3* по опорным элементам приспособления и фиксируют их технологическими болтами, вставленными в УБО;
- по опорным поверхностям фиксатора приспособления устанавливают наружный и внутренний пояса и закрепляют их прижимами. При установке поясов припуск удаляется по месту;
- устанавливают накладки, соединяющие отдельные части поясов и стенок. Центры накладок располагают по середине стыка, по НО сверлят отверстия и соединяют элементы на технологические болты;
- профили жесткости устанавливают на стенки по СО и закрепляют их технологическими болтами.

Собранный таким образом шпангоут вынимают из стапеля и производят клепку с помощью клепального автомата или с использованием сверлильных станков и прессов. Расположение крепежных элементов при клепке на автомате наносится на поверхность шпангоута с помощью трафарета. Если в технологическом процессе не предусмотрено применение клепального автомата, положение крепежных элементов могут определять НО в деталях, которые пробивают в заготовительно-штамповочных цехах и их наличие указывается в карте поставки.

Рассмотрим технологический процесс сборки типовой конструкции клепаного отсека, который включает в себя верхний *2* и нижний *1* торцевые шпангоуты, стрингеры *3*, фитинги *4*, промежуточные шпангоуты *6* и обшивки *5*. Стрингеры обычно выполняются из тавровых, уголковых или Z-образных профилей, фитинги служат для соединения стрингеров с торцевыми шпангоутами, промежуточные шпангоуты имеют облегченную конструкцию Z-образного сечения (рис.3.39). Все детали изготовлены из алюминиевых сплавов Д16, Д19, В95, АК-4, заклепки из Д18П, В65, В94 и защищены от коррозии анодированным слоем, электрическая проводимость которого недостаточна. Во избежание образования на обшивке заряда статического электричества небольшая часть расположенных на ней заклепок выполнена из сплава АМг-5, относящегося к коррозионно-стойким. Они менее прочны, но зато не нуждаются в покрытии. Через эти заклепки электрический заряд стекает на массивные детали силового каркаса. Поверхность фитингов обрабатывают в соответствии с кривизной торцевых шпангоутов, на узких фитингах эта поверхность плоская. В конструкции большинства отсеков массивные (силовые)

стрингеры чередуются с легкими. Последние часто не имеют законцовок и фитингов, в этом случае на концах стрингеров выполнены подсечки для сопряжения с торцевыми шпангоутами.

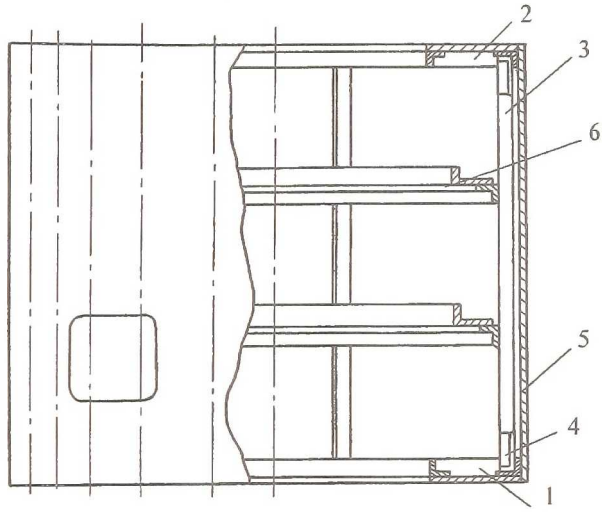


Рис.3.39. Конструкция отсека

Обшивки поставляют на сборку с односторонней подсечкой в местах соединения внахлест. Тонкостенные обшивки (1,5...2 мм) поставляют плоскими. Контуры обшивок, включая окна, получают по шаблону обрезки и кондуктору (ШОК). По нему сверлят на подсеченном крае НО под заклепки и СО для фиксации стрингеров при сборке вне стапеля. В местах расположения окон обшивки усиливают с помощью окантовок. Толщина окантовок 2...3 мм.

Обшивки панелированных отсеков входят в состав узлов, называемых панелями. Панель состоит из обшивки, собранной со стрингерами. Она может содержать также секторы промежуточных шпангоутов. Чем технологичнее конструкция отсека, тем большую часть его клепаных соединений можно выполнить при сборке узлов с применением прессовой групповой клепки, автоматизированного оборудования.

При сборке панелей применяют два способа фиксации стрингеров: по гнездам в ложементах специального приспособления и по СО стрингеров и обшивок. В условиях мелкосерийного производства второй способ экономичнее (исключаются затраты на приспособление). Для придания панели жесткости на нее с двух сторон устанавливают технологические шпангоуты секторы колец с уголковой формой сечения и кривизной такими же, как у торцевых шпангоутов отсека, на место которых они ставятся. Технологические шпангоуты соединяют через СО со стрингерами с помощью болтов. В таком виде

панели обрабатывают на сверлильном и клепальном оборудовании. Готовые панели отсоединяют от технологических шпангоутов и подают на сборочный стапель [31].

Сборка отсека производится в стапеле, который состоит из колонн *1*, верхней *3* и нижней *2* плит стыка, которые крепятся к колоннам с помощью кронштейнов *4* (рис.3.40). Верхнюю плиту можно поднимать и ставить в исходное положение с помощью пневмоцилиндров *5*. Плиты стыка представляют собой специальную оснастку, изготовленную для конкретного отсека, в них предусмотрены отверстия и кондукторные втулки для фиксации и сверления шпангоутов, базовые упоры, а также прижимы для временного закрепления собираемых деталей и узлов. Правильность установки колец на стапель, в том числе их соосность, обеспечивается фиксаторами, которые установлены в кронштейнах и входят в отверстия колец.

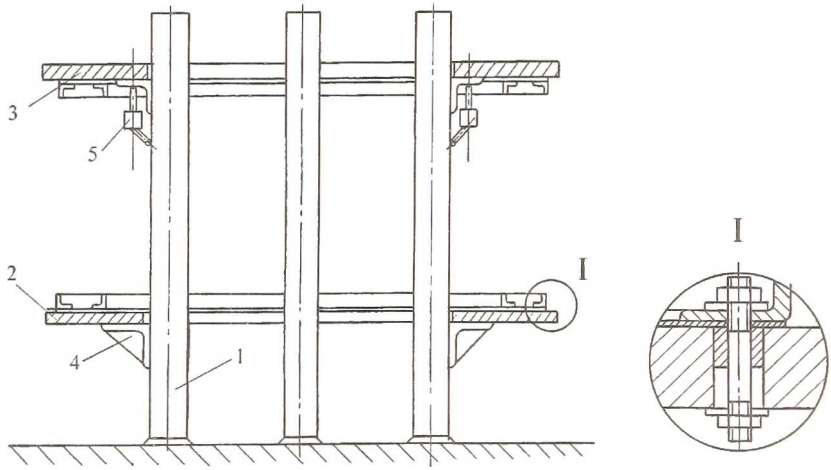


Рис.3.40. Стапель для сборки отсека

Технические условия на стапельную сборку отсеков включают допуск на смещение осей отверстий под заклепки, местное неприлегание обшивки после клепки, допуски на непараллельность, несоосность, неплоскостность торцевых шпангоутов, условия контроля диаметров отверстий, глубины зенкования, диаметра и высоты замыкающих головок.

Сборку отсека начинают с установки торцевых шпангоутов на плиты стыка стапеля по фиксаторам и закрепления их зажимами. При сборке панелированных отсеков поднимают верхнюю плиту стыка и устанавливают панели на нижний шпангоут так, что его стенка входит в зазор между обшивкой и фитингами. При этом совмещают торцевые отверстия в фитинге и шпангоуте и вставляют в них штыри стапеля. Затем опускают с помощью домкратов верхнюю

плиту, в результате верхний шпангоут также входит в зазор между обшивками и фитингами. Последние скрепляют со шпангоутом и верхней плитой стапеля. Промежуточные шпангоуты устанавливают на кронштейнах силовых стрингеров. Если промежуточные шпангоуты были заранее установлены на панелях в виде секторов, их сращивают с помощью накладок. Многие отсеки из-за особенностей своей конструкции не поддаются членению на панели. К непанелированным относятся, в частности, все конические отсеки, поскольку невозможно ввести конические стенки торцевых шпангоутов в зазор между обшивкой и фитингами, по которому огибают обшивки.

Трудоемкость стапельной сборки при этом сильно увеличивается. Торцевые шпангоуты закрепляют на плитах стыка, устанавливают силовые стрингеры и скрепляют их со стенками шпангоутов заклепками или болтами. Далее размещают промежуточные шпангоуты, базируя их по упорам, закрепленным на стойке (или стойках) стапеля. На подготовленный каркас накладывают обшивки и стягивают их бандажами по торцевым и промежуточным шпангоутам. Бандаж представляет собой брезентовый пояс со стальной лентой и стяжным винтовым замком. При правильной сборке СО обшивки и стрингеров совпадают, их рассверливают и ставят заклепки - по две на каждый стрингер. Затем снимают бандажи, сверлят отверстия в обшивке по НО стрингеров и промежуточных шпангоутов, выполняют клепку. В заключение проклепывают обшивку в местах нахлеста. Устанавливают и проклепывают окантовки, накладки, другие детали. Отсек вынимают из стапеля для доработки.

Обтекатели головных частей конструктивно отличаются от клепаных отсеков другого назначения главным образом тем, что выполнены разъемными в плоскости, содержащей ось изделия. В местах разъема вместо типовых стрингеров устанавливают массивные блоки с вмонтированными замками. Часть обшивок обтекателя выполнена из стеклотекстолита, так как экранизирующее влияние металлических обшивок затрудняет радиосвязь со спутником при подготовке старта и на начальном участке подъема ракеты.

Для сборки отсеков подобной конструкции могут применяться как специальные, так и универсальные стапели. Специальные стапели спроектированы для конкретных отсеков без переналадки на другие изделия. Они проще в эксплуатации и могут быть оснащены различным специальным оборудованием. Универсальные стапели могут переналаживаться для сборки различных отсеков подобного типа и размера. При этом на колоннах стапеля расположены отверстия для установки кронштейнов, фиксации плит на различной высоте и имеются комплекты плит для сборки каждого из отсеков.

Вне стапеля производят установку арматуры внутри отсека, рассверливают отверстия и ставят заклепки в местах, в которых была

затруднена их клепка в стапеле и в местах постановки технологических болтов.

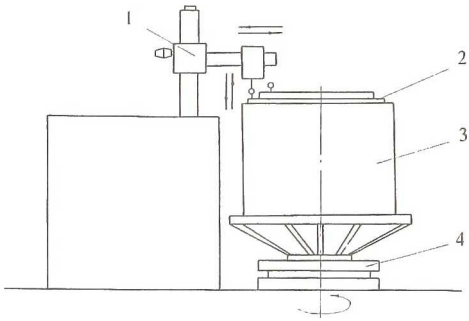


Рис.3.41. Схема стенда для разделки стыковоч-ных отверстий в шпангоутах

При сборке отсека в его деталях возникают упругие напряжения, которые вызывают соответствующую деформацию после снятия отсека со стапеля. Для обеспечения стыковки с другими отсеками стыковочные отверстия торцевых шпангоутов окончательно рассверливают в готовом отсеке *3* по кондуктору *2*. Работы выполняют на специальном станке, который состоит из поворотного стола *4* и радиально-сверлильного станка *1* (рис.3.41).

Собранный отсек подвергают контролю по основным геометрическим параметрам: соосности торцевых шпангоутов, непараллельности и неплоскостности их поверхностей, измеряют общую длину отсека и отклонение образующей внешней поверхности отсека от теоретического контура. Для этого используют обмерочный стенд с поворотным столом, линейки, щупы, шаблоны, индикаторы. Более подробно процесс обмера отсека, а также определения непараллельности и несоосности торцевых шпангоутов и других размеров приведены в разделе 8.

После контроля геометрических параметров производят покраску и нанесение покрытий, отсек взвешивают, зачехляют и отправляют на дальнейшую сборку.

3.10. Гибкие клепально-сборочные системы

Как известно, клепально-сборочное производство, являясь частью всего процесса изготовления ЛА, в свою очередь подразделяется на три этапа: узловую, агрегатную и общую сборку. Несмотря на специфические особенности этих этапов, все они отличаются большой трудоемкостью, что в значительной степени определяет высокую себестоимость изделий и делает их заманчивыми объектами для комплексной автоматизации. Однако наиболее перспективной считается автоматизация узловой сборки в силу относительной простоты конструкции узлов и меньшего разнообразия используемых технологических приемов [47].

Отдельные группы узлов ЛА (панели, шпангоуты, лонжероны, и т.д.) обладают высокой общностью, поскольку входящие в них детали, несмотря на различия в формах и размерах, имеют сходные

конструктивные элементы и одинаковым образом соединены между собой. Технологические процессы изготовления таких узлов сходны, различаясь качественно лишь порядком выполнения отдельных операций и их повторяемостью. Указанные особенности технологических процессов позволяют относить их к групповым (т.е. к технологическим процессам изготовления изделий, обладающих разными конструктивными, но общими технологическими признаками).

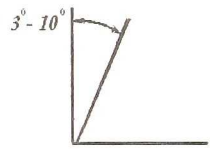
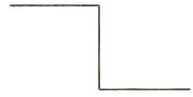
Анализируя современные тенденции в машиностроении, можно убедиться, что основные надежды по обеспечиванию производительности, уменьшению сроков подготовки производства и снижению себестоимости в мелкосерийных многономенклатурных производствах, к которым относятся и клепально-сборочное производство, возлагаются на гибкие производственные системы (ГПС). Основой ГПС является групповой метод организации технологических процессов и универсальное оборудование с числовым программным управлением (ЧПУ) от ЭВМ. А поскольку технологические процессы изготовления некоторых групп узлов являются по сути дела групповыми, то задача их автоматизации сводится к созданию оборудования, реализующего эти процессы по типу ГПС в механической обработке. Причем процессы выполнения соединений должны рассматриваться как элементы комплексно автоматизированного технологического процесса сборки. Соответственно, клепальные автоматы должны являться составными частями указанного оборудования.

Используемое в настоящее время автоматическое оборудование, независимо от его назначения, создается для реализации специально под него разрабатываемых технологических процессов, которые в соответствии с принципом вариантности могут существенным образом отличаться даже применительно к одному изделию. Поэто-му автоматизация процессов сборки узлов ЛА должна начинаться с переосмысления имеющихся теоретических положений и практического опыта, ориентированных на ручное производство. Так, например, из используемых в ручном производстве методов сборки без приспособлений: по базовой детали; по сборочным отверстиям и по разметке - для автоматизации годны лишь первые два. Следует отметить, что работы в этом направлении ведутся достаточно интенсивно, однако до настоящего времени цельной стройной концепции гибких клепально-сборочных систем не разработано. В связи с этим рассмотрим общие подходы на примере плоских каркасных узлов самолетов (табл.3.3).

Плоские каркасные узлы (лонжероны, нервюры и т.п.) обладают общностью номенклатуры входящих в них деталей: обводообразующих поясов, стенок, подкрепляющих стоек. Несмотря на различие в размерах и толщинах стенок, формах и размерах поперечных сечений поясов, конфигурациях, размерах и формах сечений стоек,

Таблица 3.3.

Анализ конструкций нервюр Ту-154М

Наименование	Нервюра	
	киля	центроплана
Габаритные размеры, мм	360+1340х222+350	1100+2500х400+1200
Толщина стенки,мм	1	0,8+3,5
Число составляющих стенки, шт.	2	1+3
Профиль поясов		
Габаритные размеры профиля пояса, мм	20х15 20х20	20х20 40х20 75х40 25х25 60х60
Профиль стенок		
Габаритные размеры профиля стойки, мм	20х20	40х20 30х20 25х20 50х20 45х30 35х30
Число стоек на один лонжерон, шт.	4+14	8+12
Узлы навески/герметик/ /др. элементы	да/нет/да	нет/да/да
Тип, габаритные размеры и количество заклепок на машину, шт.	ЗП:Д3,5-Н6, 7 (702) Д4-Н8÷10(1233) Д5-Н12(112)	ЗП:Д3,5-Н6÷8(401) Д4-Н6-16,20(10628) Д5-Н10÷18(4432) Д6-Н15(9) ЗУ:Д2,6-Н5,11(19)
Трудоемкость клепки,н.ч.	23	204

они имеют некоторые конструктивно схожие элементы: плоские поверхности стенок; плоскую полку обводообразующего пояса, предназначенную для соединения со стенкой; полки подкрепляющих стоек с привалочной поверхностью (плоской или подсеченной) для соединения со стенкой и поясами, а также как минимум одну свободную полку, перпендикулярную или наклонную к привалочной.

В самолетостроении для сборки таких узлов используются два метода: сборка по СО и сборка в приспособлениях, каждому из которых соответствует свой технологический процесс, рассматриваемый в качестве основы для автоматизации.

При сборке по СО на стенке, на плоских полках поясов и привалочных полках стоек заранее предусмотрены отверстия, которые должны быть совмещены для достижения правильного взаимно-

го расположения деталей узла (см. рис.1.7). Возложив функции такого совмещения на робота, можно достигнуть необходимой гибкости и производительности. Необходимо, однако, отметить, что поиск отверстия с заранее неизвестными координатами задача технически очень сложная, несмотря на кажущуюся простоту процесса, реализация его требует очень дорогостоящих систем, вплоть до технического зрения. Переход же к предварительному ориентированию деталей с координацией по СО несколько снижает гибкость процесса.

Технологический процесс сборки плоских каркасных узлов в приспособлениях содержит операции установки и фиксации обводообразующих поясов и стенок, установки подкрепляющих стоек, а также выполнения заклепочных соединений. Постановка задачи о реализации этого процесса в автоматизированном варианте для некоторой группы узлов предполагает создание комплекса, реализующего весь процесс, на одном рабочем месте, поскольку транспортировка деталей, имеющих малую жесткость, затруднительна. Комплекс должен включать в себя: клепальный автомат для выполнения всех без исключения заклепочных соединений; приспособление для базирования деталей узлов в сборочных приспособлениях; устройства для автоматической подачи деталей в приспособление; устройства автоматической установки деталей, для которых в приспособлении фиксаторы не предусмотрены; устройства автоматической выгрузки готовых узлов; систему питания автомата заклепками; систему ЧПУ перемещениями автомата и переналадкой сборочного приспособления.

Вполне очевидно, что экономическая эффективность такого комплекса, имеющего возможность многосменного функционирования, может быть обеспечена только при условии его высокой производительности и универсальности, обеспечивающих программу выпуска групп узлов независимо от их принадлежности к освоенному или вновь запускаемому в производство изделию.

Указанные условия предъявляют ряд специфических требований к входящим в комплекс элементам и требуют тщательного распределения их традиционных и новых функций.

В качестве примера рассмотрим один из возможных вариантов комплекса (рис.3.42), реализующего следующие принципы:

- сборочное приспособление предназначено для удержания в сборочном положении только обводообразующих поясов и стенок, которые устанавливаются вручную, а также для предварительного базирования подкрепляющих стоек;
- функции переноса подкрепляющих стоек из положения предварительного базирования в сборочное положение, а также переналадки сборочного приспособления возложены на клепальный

автомат, оснащенный специальным захватным устройством, и систему ЧПУ перемещениями автомата;

- заклепки подаются к автомату по трубопроводу от специального блока по команде системы ЧПУ в соответствии с программой;
- выемка готового изделия осуществляется вручную.

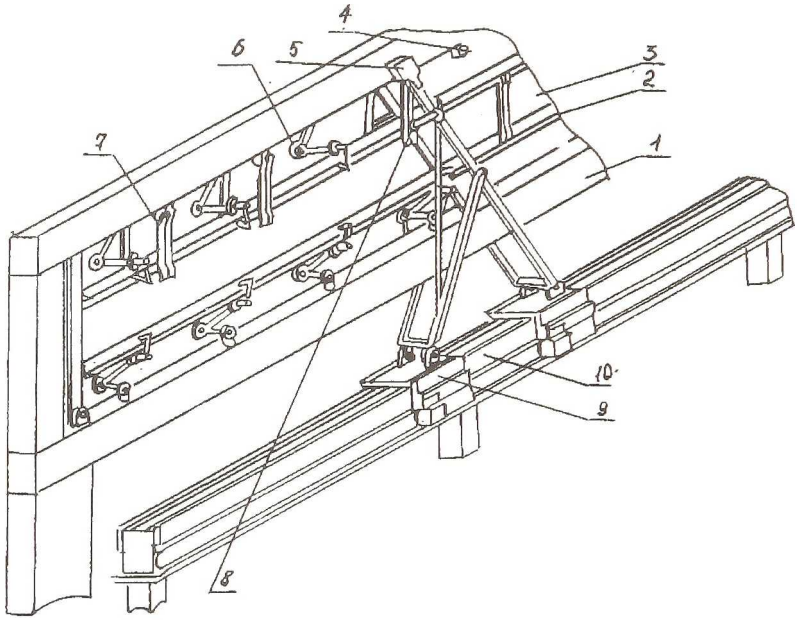


Рис.3.42. Общий вид гибкого клепально-сборочного комплекса по изготовлению плоских каркасных узлов:

1 сборочное приспособление; 2 пояс лонжерона; 3 стенка; 4 штыри для предварительного базирования стоек; 5 импульсный клепальный автомат; 6 ложемент сборочного приспособления; 7 - стойка; 8 - захватное устройство; 9 - ползуны системы позиционирования автомата; 10 - направляющие

Перечисленные принципы подразумевают, что сборочное приспособление должно отвечать требованиям универсальности по габаритным размерам узлов, по малкам обводообразующих профилей, по фиксации профилей и стенок, обеспечивать отсутствие недоступных для автомата "мертвых" зон, а также переналадку с помощью клепального автомата. Указанным требованиям отвечает сборочное приспособление (рис.3.43), ложементы *3* которого размещены по жесткой раме *1* посредством плоских механизмов *2* и снабжены ловителями *4* для захвата их прижимами клепального автомата *6*. При расторможенных подвижных соединениях *5* механизм под действием пружин складывается, выводя ложемент с ловителями в исходное положение. Это положение характеризуется фактическими

координатами оси ловителей, которые из-за зазоров механизма могут не совпадать с заранее введенными в систему ЧПУ теоретическими значениями координат. По команде системы ЧПУ на переналадку автомат выводится в зону исходного положения ложемента (рис.3.43, а) так, что координаты прижимов автомата совпадают с теоретическими координатами оси ловителей. Последующий подвод прижимов автомата к ложементу приводит к захвату ловителей с одновременным центрированием до совпадения их осей. При этом ложемент перемещается до теоретических исходных координат.

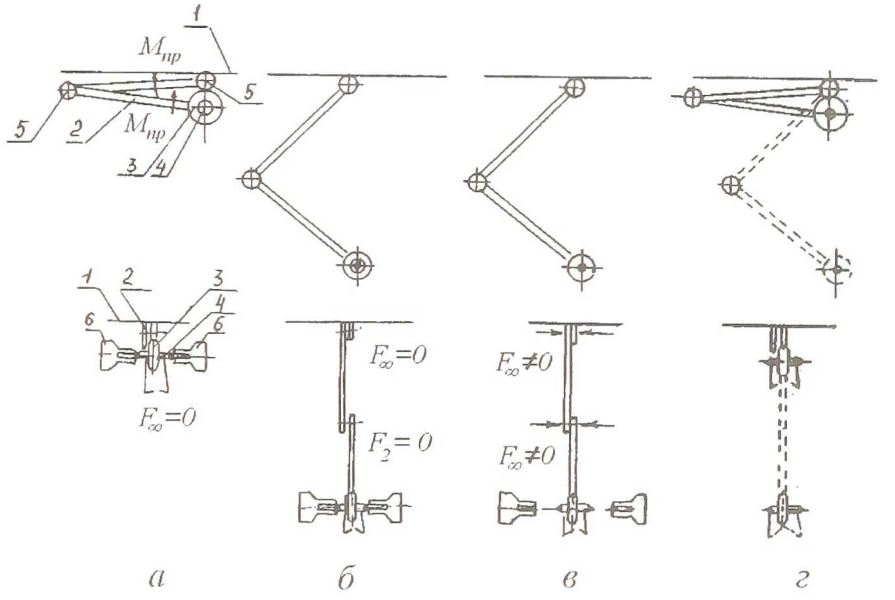


Рис.3.43. Схема переналадки сборочного приспособления

После захвата ложемента клепальный автомат под управлением системы ЧПУ перемещается вместе с ложементом (рис.3.43, б) и доводит его до рабочего положения, характеризуемого соответствующими координатами оси ловителя. Наличие, как минимум, двух степеней свободы у плоского механизма позволяет ложементу перемещаться по любой плоской траектории без заклинивания. Выведенный в рабочее положение ложемент фиксируется устройствами фиксации подвижных соединений механизма, и прижимы автомата могут быть отведены от ложемента (рис.3.43, в). Таким образом, производится наладка всех ложементов, на которые затем устанавливаются детали узла.

Каждый из ложементов имеет (рис.3.44) универсальный обводообразующий базовый элемент *1* в виде тела вращения, ось которого совпадает с осью ловителей *3*, а также опорный базовый элемент *2*

в виде крюка, опорная поверхность которого находится в базовой плоскости сборочного приспособления. Такое расположение баз в ложементе гарантирует точное базирование обводообразующих поясов *5*, независимо от малки, и позволяет точно увязать теоретический контур узла с положением оси ловителей, что очень важно при подготовке рабочих программ изготовления узлов для ЧПУ

Установка стенки *6* (рис.3.44, а) и пояса на ложемент осуществляется вручную при откинутом прижиме *4*, подвод которого исключает выпадение деталей из приспособления. Предварительное поджатие пакета к одному базовому элементу (рис.3.44, б) осуществляется путем перемещения прижима в направляющих ловителя, после чего осуществляется окончательное базирование (рис.3.44, в) за счет поджатия пояса к обводообразующему базовому элементу путем перемещения опорного базового элемента, который при этом может поворачиваться вместе с ловителем до положения, перпендикулярного обводу пояса.

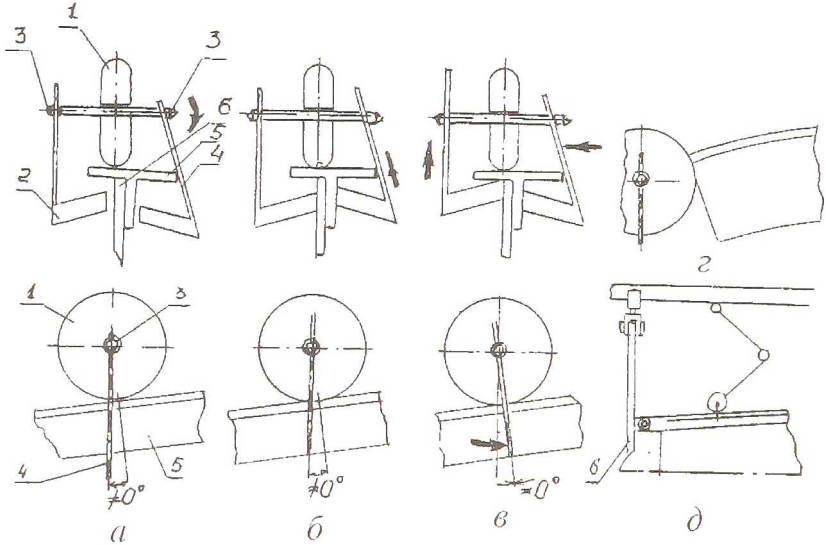


Рис.3.44. Схема базирования обводообразующих поясов

Точное положение поясов вдоль их длины обеспечивается или за счет упора в специально выставляемый универсальный ложемент (рис.3.44, г), или за счет установки в приспособление шаблонов с ответными узлами фиксации (рис.3.44, д).

Отсутствие "мертвых" зон для доступа автомата обеспечивается за счет подвижного опорного базового элемента и прижимов ложемента, возникающих под воздействием прижимов автомата, которые просто "отодвигают" мешающие элементы приспособления в сторону, при этом опорный базовый элемент сохраняет свои опорные

функции, но он должен быть отведен от обводообразующего базового элемента (рис.3.44, б).

Предварительное базирование подкрепляющих стоек 1 (рис.3.45, а) осуществляется путем развешивания их направляющими отверстиями на ступенчатые координатные штыри 2, оси которых перпендикулярны базовой плоскости приспособления. Подвешенная таким образом стойка под действием сил тяжести занимает некоторое положение. Захват стойки захватным устройством клепального автомата начинается с вывода автомата в положение, при котором оси координатного штыря и прижимов *3* автомата совпадают. Подвод прижима обеспечивает поджатие стойки *1* к опорной поверхности ступенчатого штыря, при этом стойка теряет все степени подвижности, кроме возможности поворота относительно оси штыря.

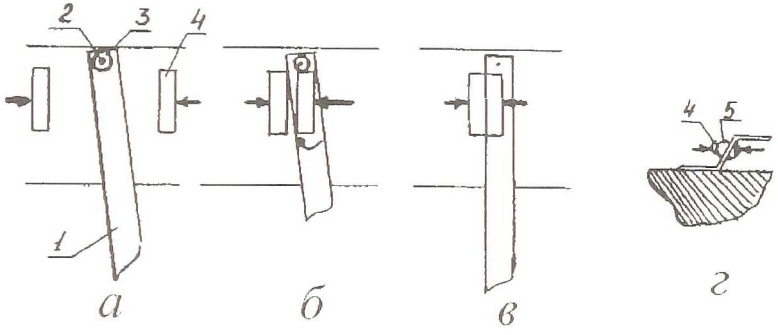


Рис.3.45. Схема предварительного базирования и захвата подкрепляющих стоек

Привод размещенного на клепальном автомате дифференциального захватного устройства обеспечивает сближение губок *4* по жестким траекториям, независимо от длины и направления перемещений каждой из них. В связи с этим закрытие захватного устройства сопровождается разворотом стойки в положение, параллельное сборочному (рис.3.45, б, в). Для обеспечения захвата профилей с наклонными элементами губки оснащаются поворотными вкладышами *5* (рис.3.45, г). После закрытия губок захватного устройства заклинивается, что обеспечивает неизменность положения стойки относительно клепального автомата при снятии ее со штыря за счет отвода схвата и прижима и при переносе ее в сборочное положение. При наличии стоек с двух сторон собираемого узла координатные штыри должны быть предусмотрены с двух сторон приспособления.

Рассмотренный вариант гибкого комплекса предусматривает использование ручного труда, однако возможна реализация и полностью автоматизированного варианта. Определяющее значение в этом случае должен иметь критерий экономической эффективности оборудования.

3.11.Контроль качества заклепочных соединений

На каждый агрегат клепаной конструкции устанавливаются требования на размеры и отклонения параметров заклепочных швов. Эти требования указаны в технических условиях на изготовление агрегата.

В зависимости от объекта сборки и мест расположения заклепочных швов контролировать их качество можно пооперационно, по готовому шву и на готовом изделии [70, 72]. Пооперационный контроль заключается в проверке таких операций, как сборка пакета деталей под клепку, сверление и зенкование отверстий, установка заклепок, расклепывание заклепок, проверка состояния пакета деталей после клепки и т.п. На неответственных узлах и панелях качество некоторых заклепочных швов не подвергается пооперационному контролю, а контролируется при приемке детали или узла в целом.

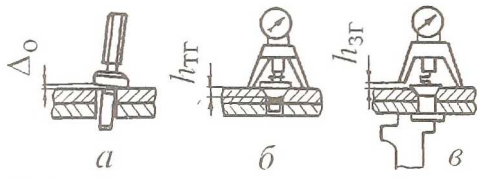


Рис.3.46. Контроль заклепочных соединений

Наиболее распространенным методом контроля заклепочного шва являются внешний - визуальный осмотр и определение размеров основных параметров шва универсальным и специальным инструментом. При пооперационном контроле диаметр и овальность отверстий под заклепки проверяют со стороны входа сверла с помощью специальных калибров (рис.3.46, а). Глубину зенкованных гнезд под потайные заклепки проверяют с помощью калибра-заклепки и индикаторного приспособления, которое настраивают на нулевое значение по калибру-гнезду (рис.3.46, б).

Контроль заклепочных соединений включает в себя проверку правильности расположения центров отверстий под заклепки универсальным и специальным измерительным инструментом: масштабными линейками, шаговыми линейками, штангенциркулем, сверку с чертежами и техническими условиями на клепку. Плотность прилегания головок заклепок к поверхностям соединяемых деталей контролируют с помощью щупов. Диаметр и высоту замыкающих головок заклепок проверяют предельными шаблонами, а высоту выступания потайных головок заклепок относительно поверхности обшивки измеряют индикаторным прибором (рис.3.46, в).

Качество поверхности обшивки контролируют визуально на наличие царапин и с помощью шаблонов, линеек и щупов, которыми определяют величину деформаций, вызванных процессами клепки.

Наличие коробления и поводок деталей, входящих в собранный пакет, говорит о недостатках технологического процесса. Предупредить появление коробления и поводки можно правильным

выбором последовательности расклепывания заклепок и другими методами, рассмотренными в 3.4.

Проблема повышения надежности и долговечности ЛА приобретает все большую актуальность в связи с необходимостью дальнейшего повышения безопасности полетов и увеличения срока службы самолетов и вертолетов. Решающее влияние на долговечность элементов конструкции оказывает концентрация напряжений в наиболее нагруженных сечениях (в частности, в зоне отверстий под заклепками и болтами соединяемых деталей).

Многолетняя практика эксплуатации ЛА показывает, что наличие разрушений в конструкции часто определяется качеством выполнения болтовых и клепаных соединений, основная функция которых состоит в передаче силы с одного элемента конструкции изделия на другой. Соединения должны обеспечивать: требуемую прочность, жесткость и выносливость; гладкость поверхности соединяемых деталей; антикоррозионную стойкость; герметичность швов изделий. Удовлетворение указанным требованиям зависит от параметров швов, технологии их выполнения и вида применяемого оборудования. Технология выполнения операций по сверлению отверстий, зенкованию гнезд и клепки должна обеспечивать: перпендикулярность осей отверстий к поверхности детали в данной точке; отсутствие у отверстий гранености, рваных кромок, трещин и заусенцев; перпендикулярность оси гнезда к поверхности обшивки в данной точке и совпадение оси гнезда с осью отверстия; отсутствие задиров на поверхности зенкованного гнезда; отсутствие трещин и рваных кромок в пробитых отверстиях и штампованных гнездах; отсутствие зарубок, трещин, подсечек и других повреждений на поверхности закладной головки.

4. ОСОБЕННОСТИ СБОРКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОНСТРУКЦИЯХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

4.1. Классификация и характеристика композиционных материалов

Развитие научно-технического прогресса в авиакосмической промышленности немыслимо без создания новых конструкционных материалов, способных улучшить важнейшие параметры ЛА и двигателей, повысить массовые показатели, надежность, ресурс и снизить материалоемкость. Успехи науки в области материаловедения привели к созданию нового класса материалов, так называемых композиционных, имеющих высокие значения прочности, жесткости, сопротивления усталости и жаропрочности при меньшей плотности, чем у традиционных сплавов.

С созданием этих новых материалов связываются самые смелые конструкторские решения по осуществлению перспективных ЛА и их двигателей.

Наиболее полное определение понятия композиционные материалы (КМ) дано в работе [45], в соответствии с которым композиционными называются материалы, имеющие следующую совокупность признаков:

1) наличие в материале двух или более компонентов (фаз), существенно различающихся по своему составу и разграниченных четко выраженной границей раздела;
2) заранее известное или "запроектированное" сочетание компонентов, их состава, формы и распределения;
3) отсутствуя в природе, КМ является продуктом, созданным человеком;
4) свойства материала определяются каждым из его компонентов, которые в связи с этим должны присутствовать в материале в достаточных количествах;
5) материал обладает такими рабочими свойствами, которые не имеют его компоненты, взятые в отдельности;
6) материал является однородным в макромасштабе и неоднородным в микромасштабе, то есть характеризуется "повторяющейся" геометрией или равномерным распределением компонентов по отношению друг к другу.

По структурным признакам КМ могут быть разделены на две основные группы: 1) волокнистые и слоистые; 2) дисперсно-упрочненные.

Волокнистые композиции состоят из матрицы, содержащей упрочняющие одномерные элементы в форме волокон (проволоки), нитевидных кристаллов и др. Слоистыми композициями называются системы, состоящие из набора чередующихся двухмерных армирующих компонентов в виде листовых, пластинчатых и фольговых материалов, жестко связанных между собой по всей поверхности. К другой группе по структурным признакам относятся дисперсноупрочненные материалы, содержащие равномерно распределенные в объеме матрицы ультрадисперсные нуль-мерные частицы, не взаимодействующие активно с матрицей и не растворяющиеся в ней.

Разделение КМ по структурным признакам на две группы позволяет выявить их принципиальные различия.

У волокнистых и слоистых КМ несущим элементом является армирующее волокно, проволока, фольга (фаза - упрочнитель). Армирующие элементы по своей природе имеют высокую прочность, весьма высокий модуль упругости и, как правило, сравнительно низкую плотность.

В дисперсноупрочненных материалах, наоборот, несущим элементом является матрица, в которой с помощью множества ультрадисперсных, практически не растворяющихся частиц и однородной дислокационной структуры создается эффективное торможение дислокаций вплоть до температуры начала плавления.

Все КМ можно разделить по следующим классификационным признакам [67]: А) форме и размерам компонентов; Б) расположению компонентов (схеме армирования); В) природе компонентов.

А. По форме и размерам компонентов КМ могут быть разделены на три основные группы.

1. КМ с нуль-мерными компонентами, имеющими все три размера одного и того же порядка. Примерами композиций этой группы могут служить дисперсноупрочненные материалы, металлы и сплавы, армированные частицами, материалы на основе керамики, содержащие в составе короткие нитевидные кристаллы (длина которых намного меньше характерного размера элементарного образца КМ) и т.п.
2. КМ с одномерными компонентами, один из размеров которых значительно превышает два других и соизмерим с характерным размером элементарного образца композиции. Примером этой группы материалов являются волокнистые КМ на основе полимеров, металлов и т.п., армированные стеклянными, борными, углеродными, керамическими и другими волокнами.
3. КМ с двухмерными компонентами, два размера которых значительно превышают третий и соизмеримы с характерным размером элементарного образца КМ. Примером материалов этой группы

являются слоистые материалы, например композиции, состоящие из чередующихся слоев титана и алюминия или их сплавов.

Б. По расположению компонентов (схеме армирования) КМ могут быть разделены на три группы.

1. Композиции с одноосным (линейным) расположением армирующего компонента, составляющие которого в виде волокон, проволок или ориентированных цепочек нитевидных кристаллов распределяются в матрице параллельно друг другу. Такая схема армирования может быть осуществлена с помощью нуль-мерных или одномерных компонентов.
2. КМ с двухосным (плоскостным) расположением армирующего компонента, составляющие которого в виде волокон, фольг, матов из нитевидных кристаллов и т. п. расположены в матрице в плоскостях, параллельных друг другу. Такая схема армирования может быть осуществлена с помощью нуль-мерных, одномерных или двухмерных компонентов.
3. КМ с трехосным (объемным) расположением компонентов, когда невозможно выделить одно или два преимущественных направления в материале. Такая схема армирования может быть реализована с помощью нуль-мерных или одномерных компонентов.

В. По природе компонентов КМ разделяют на четыре группы: с компонентом из металлов и сплавов; с компонентом из неметаллических элементов (например, углерода); с компонентом из неорганических соединений (окислов, карбидов, нитридов и т. п.); с компонентом из органических соединений.

Для полной характеристики КМ необходимо указать природу каждого из его компонентов. Так, например, КМ углерод углерод относится по природе матрицы к группе композиций с матрицей из неметаллических элементов, по природе армирующего компонента к группе композиций со вторым компонентом из неметаллических элементов. Углепластики относятся по природе матрицы к группе КМ с матрицей из органических соединений, по природе армирующего компонента к группе со вторым компонентом из неметаллических элементов. Дополнениями к рассмотренным группам являются полиматричные и полиармированные КМ. Полиматричные КМ (рис.4.1, а) состоят из чередующихся слоев двух или более композиций с матрицами различного химического состава. Полиармированные КМ содержат два или более различных по составу армирующих компонента, равномерно распределенных в матрице относительно друг друга (рис.4.1, б) Полиармированные КМ могут быть "простыми", если содержат армирующие компоненты различной природы, но одинаковой размерности, и комбинированными, если содержат армирующие компоненты различной природы и размерности. Так, например, стеклоуглепластик является простым

полиармированным КМ, а боралюминий с прослойками из титановой фольги комбинированным полиармированным. Комбинированный КМ не относится к полиармированным, если он содержит армирующие компоненты одной природы (например, композиция на основе алюминия, армированного стальной проволокой и титановой фольгой).

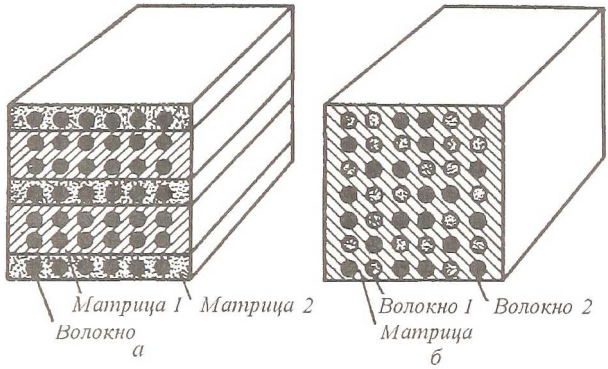


Рис.4.1. Пример полиматричного композиционного материала

Волокнистые КМ наиболее перспективный класс КМ, обладающих широким спектром физико-механических свойств и, прежде всего, высокой конструктивной эффективностью. В волокнистых КМ волокна определяют уровень прочностных свойств при условии их совместимости со связующим материалом. Напряжения, возникающие в композиции при нагружении, воспринимаются в основном армирующими волокнами, которые придают композиции прочность и жесткость в направлении ориентации волокон, а достаточная вязкость разрушения обусловлена пластичностью связующего материала и специфическим механизмом развития трещин в композиции.

В настоящее время можно считать, что сплавы железа и алюминия уже почти достигли своего потолка конструкционной прочности. За последние 50 лет предел прочности алюминия путем легирования и термообработки удалось повысить с 200 до 700 МПа, т.е. более чем в 3 раза. Однако предел усталости алюминиевых сплавов увеличился всего на 30...40 МПа (с 100 до 140 МПа). Также получены стали с прочностью до 3000 МПа. Однако области применения этих сталей весьма ограничены, так как с повышением прочности резко возрастает чувствительность сталей и сплавов к концентраторам напряжений, существенно снижается коррозионная стойкость и особенно сопротивление коррозии под напряжением, что уменьшает прочность и надежность деталей из таких материалов.

Волокнистые КМ, обладая высоким пределом прочности и еще меньшей пластичностью, чем высокопрочные сплавы, имеют,

однако, меньшую чувствительность к концентраторам напряжений и большее сопротивление усталостному разрушению. Это объясняется тем, что у материалов различный механизм развития трещин. В традиционных изотропных высокопрочных сталях и сплавах развитие трещин идет прогрессирующими темпами, скорость трещинообразования возрастает по мере вовлечения в очаг образования трещин все больших элементов структуры - зерен, дендридов и пр.

В волокнистых КМ другой механизм развития трещин. Трещина обычно возникает в матрице и, развиваясь, встречает препятствие на границе раздела матрица-волокно. Волокна тормозят развитие трещин, и наступает период относительной стабильности, в течение которого приостанавливается развитие трещин. Таким образом, разрушение волокнистого КМ представляет собой ряд последовательных дискретных этапов, каждый из которых отличается от другого перераспределением напряжений между армирующими волокнами.

Волокнистые КМ, состоящие, как указывалось, из чередующихся регулярным образом хрупких армирующих волокон в пластичной матрице, обладают достаточно высокой вязкостью разрушения.

Таким образом, в композиционной системе сочетаются два противоположных свойства, необходимых для конструкционных материалов высокий предел прочности и достаточная вязкость разрушения. Высокая прочность достигается за счет использования хрупких высокопрочных волокон, а достаточная вязкость разрушения обусловлена пластичной матрицей и специфическим механизмом рассеяния энергии разрушения композиции. Кроме того, в традиционных сплавах удельная жесткость практически одинакова, а в волокнистых КМ она увеличивается на 100...200%. Это позволяет существенно снизить материалоемкость конструкций и повысить их эффективность по массе.

Из всех армирующих материалов борные и углеродные волокна являются одними из наиболее перспективных для упрочнения алюминиевых, магниевых, титановых и других металлических, а также полимерных матриц, в связи с тем, что предел прочности указанных волокон составляет 3500 МПа, а модуль упругости до 420000 МПа при плотности 1700...2630 кг/м^3. Это обеспечивает достижение в волокнистых КМ весьма высоких значений удельной прочности и удельного модуля упругости.

К неметаллическим армирующим компонентам относятся волокна: борные, углеродные, карбида кремния, окиси алюминия и др. К металлическим волокна (проволока) бериллия, вольфрама, молибдена, стали и других сплавов [73].

Монокристаллические волокна нитевидные кристаллы (усы) обладают уникально высокой прочностью, приближающейся к

теоретической (28000...37000 МПа). Однако пока применение их весьма ограничено.

В настоящее время наибольшее применение в конструкциях ЛА находят полимерные волокнистые КМ, предназначенные для изготовления деталей, непременным компонентом которых является какой-либо полимер, в период формирования изделий находящийся в пластическом или вязкотекучем состоянии, а при эксплуатации в стеклообразном или кристаллическом.

Из всего разнообразия полимерных волокнистых КМ рассмотрим только широко используемые высокопрочные КМ, такие как стекло-, органо-, боро- и углепластики, а также их возможные композиции.

Стеклопластики материалы, наполнителем в которых используют высокопрочные и высокомодульные волокна из бесщелочного алюмоборосиликатного, магний-алюмосиликатного и других составов стекол. В зависимости от взаимной ориентации волокон стеклопластики подразделяют на однонаправленные, когда все волокна уложены в одном направлении, и перекрестные - волокна расположены под углом друг к другу. Для однонаправленых стеклопластиков наибольшие показатели механических свойств-вдоль волокон, наименьшие перпендикулярно им. Механические свойства изделий с перекрестным расположением волокон определяются соотношением волокон в направлениях главных осей и приложения нагрузки. С изменением объемного содержания волокон в КМ меняются его механические свойства, однако предельная степень наполнителя для стеклопластиков составляет 65...67%.

Стеклопластики отличаются от других конструкционных материалов сочетанием высокой прочности, низкой плотности и теплопроводности, хороших электроизоляционных свойств и сравнительно низкой стоимости наполнителя. Технологическим достоинством стеклопластиков является возможность изготовления узлов и конструкций сложной формы путем формования с применением достаточно простого оборудования. Благодаря своим свойствам стеклопластики находят широкое применение в авиации для изготовления панелей вертолетов, секций крыльев и хвостового оперения, топливных баков, перегородок, воздуховодов, фюзеляжей маломестных самолетов и др.; в ракетной технике - для изготовления корпусов ракет и ракетных двигателей, обтекателей и т.д.

Основная масса стеклопластиков может долго работать при температурах 130...150°С и кратковременно до 250°С. Стеклопластики на основе эпоксидных смол работают при температурах до 200°С, а на основе кремнийорганических связующих до 400°С. Основные методы получения деталей ЛА из высокопрочных стеклопластиков - намотка и прессование.

Органопластики материалы, наполнителем в которых являются синтетические или природные органические волокна, то есть это полимер, наполненный полимером. Органопластики широко применяются в конструкциях ЛА, испытывающих высокие растягивающие нагрузки от внутреннего действия среды с высоким давлением или центробежной силы, воздействие механического или акустического удара, длительного воздействия знакопеременных и циклических нагрузок.

В качестве волокон для производства органопластиков применяются полиамидные, полиэтилентерефталатные и другие природные и синтетические волокна. Однако, наибольший интерес представляют волокна на основе ароматических полиамидов и полиимидов, так как они устойчивы до температуры 300°С и сохраняют достаточно высокие механические показатели при 400...500°С.

Изделия из органопластиков можно получать всеми известными для стеклопластиков методами, причем для изготовления изделий конструкционного назначения находят применение высокопрочные синтетические волокна в виде нитей, жгутов, лент, полотен и т.д.

Применение органопластиков в высоконагруженных агрегатах вертолета лопасти несущего винта - дало возможность дифференциально изменять жесткостные характеристики лопасти в несколько раз при одновременном уменьшении её массы на 20%.

Большое применение находят органопластики при изготовлении обтекателей головной части ракет, обтекателей антенн на самолетах, корпусов и деталей приборов ЛА, крышек, панелей и т.д.

Боропластики материалы, наполнителем которых являются волокна бора, обладающие наиболее высокими показателями удельной прочности и жесткости из всех волокон, пригодных для использования в качестве наполнителя.

Боропластики получают всеми известными методами получения полимерных волокнистых КМ намоткой, прессованием, гидровакуумным формованием и т.д.

Боропластики могут быть однонаправленные или с перекрестным расположением волокон, причем максимально модуль упругости и прочность реализуются в однонаправленных композициях.

Основное применение боропластики находят при изготовлении профилей балок, стрингеров, панелей ЛА, для изготовления лопастей несущих и хвостовых винтов вертолетов, отсеков фюзеляжа и обшивки крыльев.

Основным недостатком боропластика как конструкционного материала является его высокая стоимость, что объясняется сложностью изготовления борных волокон и необходимостью применения вольфрама в качестве подложки.

Углепластики материалы, содержащие в качестве наполнителя углеродные волокна, полученные высокотемпературным пиролизом органических волокон в инертной среде. В качестве связующего для углепластиков применяются главным образом эпоксидные смолы, так как они обладают хорошей адгезией к углеродному волокну и позволяют формовать изделия при невысоких давлениях, что особенно важно при относительно высокой хрупкости волокон.

Изделия из углепластиков получают такими методами, как намотка и прессование. Основные свойства углепластиков низкая плотность, высокий модуль упругости, высокая прочность и термостойкость, низкий коэффициент трения.

Отличительной чертой углепластика является также высокая статическая и динамическая выносливость, достаточно высокая тепло-, водостойкость и химическая стойкость. По сравнению, например, со стеклопластиками они обладают повышенной в 1,5...2 раза теплопроводностью.

Недостатком углепластиков как конструкционных материалов является их низкая по сравнению со стеклопластиками прочность сцепления между наполнителем и связующим, а также относительно высокая стоимость.

Углепластики находят широкое применение в авиационной, ракетной и космической технике, для изготовления самых разнообразных деталей и конструкций, таких как крылья, стабилизаторы, панели, лонжероны, обтекатели, шпангоуты, телескопические антенны, обшивки и т.д.

В волокнистых КМ с металлической матрицей сочетаются достоинства конструкционных металлических материалов с достоинствами композитов вообще. Для них характерны высокие значения прочностных характеристик, модулей упругости, вязкости разрушения, ударной вязкости; эти материалы сохраняют стабильность своих характеристик в более широких температурных интервалах, чем материалы с полимерными наполнителями; они обладают также высокой тепло- и электропроводностью, малой чувствительностью к тепловым ударам и поверхностным дефектам.

Для металлических волокнистых КМ в качестве матричных составляющих преимущественно применяются алюминий, титан, сплавы на основе этих металлов, а также магниевые сплавы. Наиболее изучен из металлических волокнистых КМ и находит применение в конструкциях ЛА бороалюминий. Свойства бороалюминия могут изменяться в зависимости от свойств наполнителя и матрицы, количества волокон, направления их укладки и других факторов.

Использование бороалюминия в конструкциях ЛА очень эффективно и благодаря их высокой удельной прочности и жесткости позволяет достигать очень высокого эффекта - снижения массы.

Из бороалюминия изготавливают отсеки космических ракет, обшивки самолетов, силовые панели, лонжероны, стрингеры, шпангоуты, руки грузовых манипуляторов космических аппаратов, лопатки турбины, компрессора, вентилятора и т.д.

Недостатками бороалюминия являются его высокая стоимость, трудность обработки и соединения.

В дальнейшем под термином КМ будем понимать волокнистые КМ, которые находят наибольшее применение в конструкциях ЛА.

4.2. Применение композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов

В силу того, что масса ЛА оказывает прямое влияние на его эксплуатационные показатели (дальность полета, полезную нагрузку, расход топлива и множество других взаимосвязанных факторов, зависящих от массы), эту величину следует учитывать при любой экономии массы. Ограничивающей величиной в этом случае является максимальная денежная сумма, которую потребитель готов потратить на один килограмм сэкономленной массы.

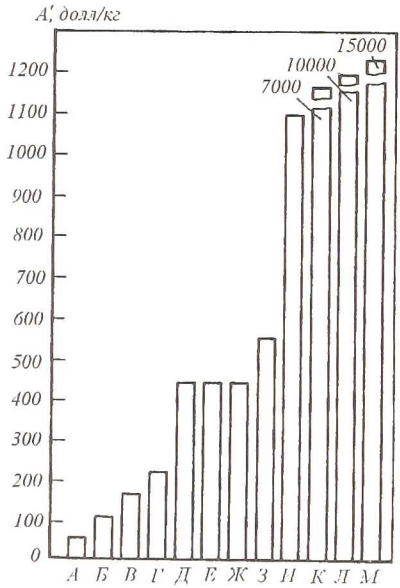


Рис.4.2. Экономия массы А' для различ-ных ЛА:

А - малые гражданские самолеты; Б вертолеты; В транспортные самолеты; Г - гражданские коммерческие самоле-ты; Д - двигатели ЛА; Е самолет "Боинг 747"; Ж - самолет-истребитель; З самолет вертикального или коротко-го взлета и посадки; И - ' сверхзвуковой транспортный самолет; К спутник с околоземной орбитой; Л - синхронный спутник (со "стационарной" орбитой); М - космический корабль "Шаттл"

Для обычных малых гражданских самолетов, которые в основном редко летают с полной нагрузкой или на предельные расстояния, отнесенное к единице массы, едва превышает 55 долл. на 1 кг. Этот показатель может быть увеличен в 10 раз и даже более для существенно сложных ЛА, таких как сверхзвуковой транспортный самолет или самолет вертикального взлета и посадки, в которых отношение полезного груза к массе ЛА является определяющим.

На рис. 4.2 показана экономия массы, определенная для ряда летательных воздушных и КА [65]. Как видно из графика в случае применения КМ в космической технике, где стоимость на единицу массы чрезвычайно высока из-за большого

количества топлива, требующегося для подъема ракеты на космическую орбиту, уменьшение стоимости, обусловленное использованием композитов, представляется очень привлекательным.

Обычное снижение массы при производстве современных военных ЛА составляет 20%, для перспективных ЛА гражданской авиации около 25%, для перспективных военных ЛА до 30-35% и для конструкций космических ЛА до 40%. Массовая доля КМ в конструкциях ЛА, как показано на рис.4.3, продолжает возрастать, и ЛА будущего будет, по-видимому, наполовину состоять из композитов [65].

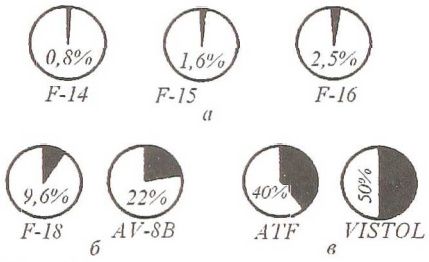


Рис.4.3. Тенденция роста массовой доли композитов в авиационных конструкциях:
а - самолета; б - опытных образцов самолетов; в на этапе разработки перспективного тактического истребителя типа ATF и самолета вертикального взлета и посадки или с коротким разбегом и выбегом типа VISTOL

Применение КМ в конструкциях оказывается весьма эффективным только в том случае, когда выполняются три условия: специальное конструирование деталей и узлов конструкций с учетом особенностей свойств этих материалов; создание специальных технологий изготовления деталей и их сборки, поскольку методы изготовления деталей и их сборка из традиционных сплавов неприемлимы для КМ; осуществление контроля технологических процессов и качества исходных материалов и изделий на основных этапах их изготовления для обеспечения надежности КМ при длительной эксплуатации.

Необходимо иметь в виду, что КМ, так же как и традиционные сплавы, не являются универсальными. Использование их по назначению в той или иной конструкции рационально только в том случае, когда это является технически обоснованным и экономически целесообразным.

Применение КМ в конструкциях ЛА возможно двумя путями: местным упрочнением металлических конструкций КМ; полной заменой металлических конструкций на конструкции из КМ.

Первый метод проще и требует меньше КМ. Второй - требует существенного пересмотра традиционных методов конструирования и целесообразен для таких конструкций, где однородные материалы близки к пределу своих возможностей.

Типичные панельные подкрепляющие элементы, которые могут составить значительную часть номенклатуры ЛА, необходимые для восприятия осевой нагрузки и обеспечения жесткости при изгибе, с местным армированием волокнами бора, показаны на рис.4.4.

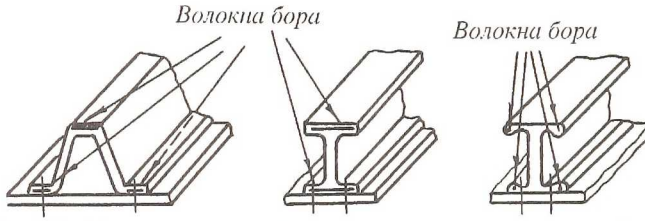


Рис. 4.4. Местное армирование элементов панелей волокнами бора

Применение таких подкрепляющих элементов в межбаковой конструкции космического корабля "Шаттл", а также кессона крыла транспортного самолета, предусматривает экономию в массе соответственно на 40 и 25%.

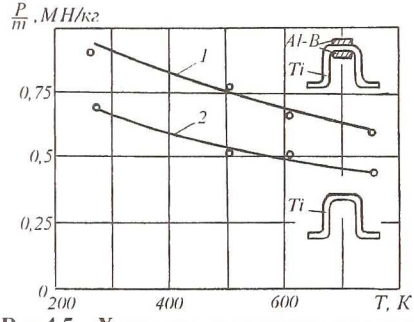


Рис.4.5. Характер изменения прочности титанового стрингера:

1 - с накладками из бороалюминия; 2 - без накладок

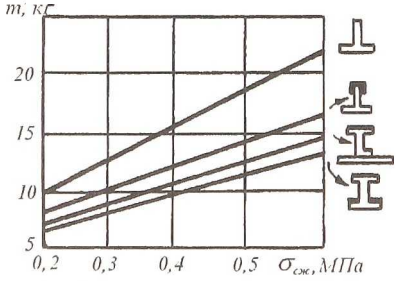


Рис. 4.6. Возможные варианты подкрепления панели из титанового сплава накладками из углепластика с однонаправленной укладкой:

■ - накладка; *m* - масса панели; $\sigma_{сж}$ - предел прочности при сжатии

Подкрепление силовых стрингеров из титана накладками из бороалюминия (рис.4.5) увеличивает массу на 9%. Однако, в этом случае удельная прочность повышается на 30% [38].

Подкрепление панелей из титанового сплава накладками из углепластика с однонаправленной укладкой (рис.4.6) позволяет значительно (до 40%) снизить их массу при сжатии [43].

Изготовление элементов силового набора ЛА из КМ (лонжеронов, нервюр, стрингеров и т.д.) позволяет достичь максимальной экономии массы (до 50% по сравнению с алюминиевыми сплавами). Для сравнения необходимо отметить, что наиболее широкое применение КМ для изготовления обшивки обеспечивает, как правило, в среднем снижение массы элементов конструкций на 20%.

Следует отметить, что наметившаяся тенденция к переходу на конструкции, практически полностью выполняемых из КМ, вызывает необходимость существенного пересмотра традиционных методов конструирования и совместного использования КМ с полимерной и металлическими матрицами [21].

Техническая эффективность применения КМ не ограничивается только снижением массы конструкций. Несомненным достоинством этих материалов, в значительной мере определяющим экономическую эффективность их применения, является снижение трудоемкости изготовления агрегатов в результате существенного уменьшения числа комплектующих деталей. Это можно проследить на примере изготовления и испытания горизонтального стабилизатора из КМ типа боропластик и углепластик для самолета В-1 [65].

Этот стабилизатор (рис.4.7) имеет площадь 22,3 м^2, корневую хорду 5,2 м и длину 9,1 м с толщиной у основания примерно 360 мм. Кессонный горизонтальный стабилизатор из КМ разрабатывали таким образом, чтобы уменьшить число деталей при сборке и тем самым снизить его стоимость. Стабилизатор собирали путем сверления отверстий в деталях из композита и соединения их с помощью болтов из коррозионно-стойкой стали и титановых крепежных элементов.

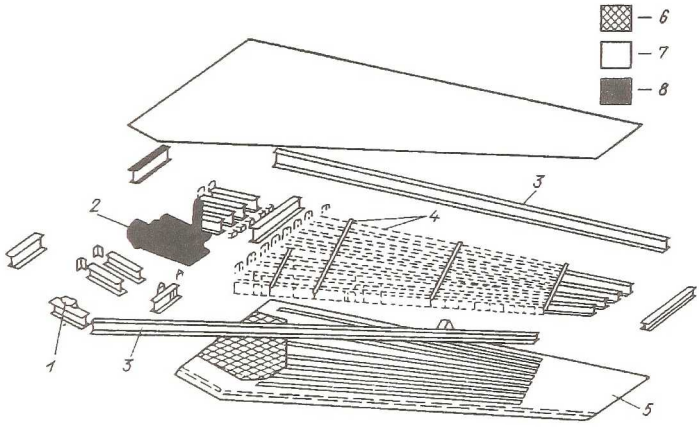


Рис.4.7. Изготовленный из композита горизонтальный стабилизатор:
1 - узел крепления подъемника (в трех точках) из алюминиевого сплава; 2 - несущая опора; 3 - швеллерные лонжероны; 4 - синусоидальные лонжероны с первиорами; 5 нижняя панель обшивки; 6 - эпоксибопластик; 7 - углепластик типа A/S; 8 - титан

Детали, подвергнутые статическим испытаниям, разрушались при нагрузке, составляющей 132% от предела прочности при сжатии. Аналогичные детали, подвергнутые усталостному нагружению, разрушались при удвоенной усталостной долговечности.

Реальная масса испытуемого стабилизатора из композита была на 227 кг ниже, чем у аналогичной металлической конструкции. Это обеспечило суммарное снижение массы на 15%. Рост стоимости панелей обшивки из композита значительно перекрылся упрощением силового набора конструкции и уменьшением расходов на сборку благодаря меньшему числу деталей. В результате суммарное снижение

стоимости стабилизатора из КМ составляет 17,5% по сравнению с расходами на металлический стабилизатор.

Выпускаемые новые серии В-767 и В-757 самолетов фирмы "Боинг" имеют большое число элементов конструкций (рули направления высоты, элероны и воздушные щитки, обтекатели, балки крепления пола, пол, элементы шпангоутов), которые изготовлены из КМ. Схема применения полимерных КМ на самолете Боинг-767 приведена на рис.4.8. Масса изделий из КМ в конструкциях самолетов фирмы "Боинг" приведена на рис.4.9 [43].

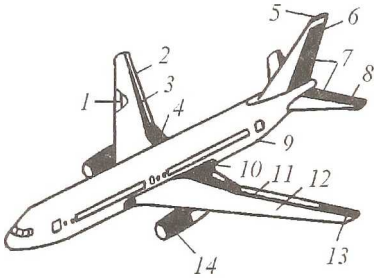


Рис. 4.8. Места расположения деталей из полимерного КМ в конструкции самолета Боинг 767:

1 - стенки лонжерона; 2, 7 - панели фиксированные задние; 3 интерцептор; 4 - элерон внутренний; 5 - законцовка киля; 6 - руль направления; 8 руль высоты; 9 облицовка грузового отсека; 10 - зализ крыла; 11 об-текатель системы выпуска закрылков; 12 обшивка верхняя и нижняя крыла, стрингеры; 13 - элерон внешний; 14 - обшивка гондолы

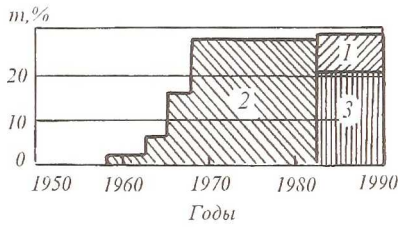


Рис. 4.9. График изменения массы *m* из-делий из различных материалов в конс-трукциях самолетов фирмы "Боинг" по годам:

1 смолы эпоксидные на основе графитных волокон; 2 - стекловолокно; 3 - полимерный КМ гибридный

В современных отечественных пассажирских самолетах ИЛ-86, ИЛ-96, ИЛ-114, "Руслан", "Мрия" используются от 4 до 17% КМ. Например, в конструкции самолета Ту-204 используется композитов 3900 кг (14% массы) по площади более 1000 м^2.

При эксплуатации композитов в авиации были выявлены прекрасные характеристики изделий из них, причем никакой разницы в ресурсе самолета в случае использования КМ не обнаружено.

Примером применения КМ в космической технике может служить разработка дверцы приборного отсека орбитальной ступени космического корабля "Шаттл". Эти детали представляют собой наибольшие сборные конструкции из композита шириной 3,7 м и длиной 18,3 м [65].

Применение бороалюминия в крупногабаритной конструкции переходного отсека ракеты диаметром 1200 мм и высотой 2100

мм, обеспечивает 45% снижения массы по сравнению с алюминиевой конструкцией, при тех же эксплуатационных характеристиках [67].

При этом из бороалюминия были изготовлены обшивки, дверца смотрового люка, узлы крепления обшивки и стрингеры. Элементы переходника скреплялись с помощью заклепок и болтов, выполненных из алюминия и стали.

Теплозащитное покрытие из КМ космического ЛА "Буран" позволяет использовать его многократно для взлета и посадки. При этом разработаны КМ на основе супертонкого кварцевого волокна и гибких элементов высокотемпературных органических волокон и КМ на основе углерода для наиболее теплонапряженных участков поверхности корпуса, таких как кромки крыла, носовой люк, передняя кромка киля. КМ в значительной степени использованы в конструкциях орбитальной научной станции "Мир", модуля "Квант", кораблей "Союз-ТМ", "Прогресс", ракеты-носителя "Энергия".

Примером использования КМ в наземном оборудовании может служить реализация программы многоразовых полетов в космос системы "Энергия-Буран" Топливом для двигателей разгонного блока служит водород и кислород, при сгорании которых образуется высокоскоростной газовый поток с температурой более 2000°С. Для защиты коммуникаций от воздействия высокотемпературного потока в конструкцию пускового устройства входит тепловая защита.

Тепловая защита коммуникаций представляет собой металлическую конструкцию, облицованную плитами из жаропрочного стеклопластика (ЖСП), теплостойкость которого находится в пределах 2100-2300°С. Габаритные размеры плит конструкции тепловой защиты от 1200×560 до 240×60 мм и толщиной от 10 до 50 мм в зависимости от места установки. Общая площадь теплозащиты может достигать несколько сот квадратных метров. Плиты из ЖСП, имеющие по торцам ступенчатый выступ, стыкуются между собой с помощью накладок или встык с нанесением на соединяемые поверхности герметика и крепятся к металлической конструкции теплозащиты с помощью болтов.

После каждого пуска ракеты "Энергия" 30-40% плит из ЖСП нуждаются в замене, но при этом сохраняются все коммуникации пускового стола.

Механическая обработка резанием таких плит по контуру и получение отверстий инструментом с алмазным покрытием вызывает специфические трудности.

Успехи, достигнутые при использовании КМ в конструкциях ЛА, вызвали ускоренное их изучение, развитие производства, разработку новых технологических процессов обработки и сборки.

4.3. Сборка деталей из композиционных материалов

Для создания конструкций ЛА из КМ детали при сборке должны соединяться друг с другом. Кроме того, эти детали должны быть пригодны для механической обработки в процессе их подготовки к сборке и в момент самой сборки. При этом те или иные технологические операции, которые будут применены, определяют эффективность и пригодность КМ в конструкциях ЛА.

В настоящее время имеется уже определенный опыт в изготовлении конструкций как из самих КМ, так и в сочетании их с алюминиевыми, стальными, титановыми сплавами, с использованием методов гибки, обрезки, подсечки, резки, фрезерования, сверления, а также различных методов соединения: пайки, точечной сварки, диффузионной сварки, клепки, склеивания и т.д.

Соединение элементов одна из важнейших проблем при создании конструкций из композитов вследствие специфических свойств этих материалов. Существенные отличия физико-механических свойств КМ от аналогичных свойств традиционных металлов и сплавов (в частности, резкая анизотропия упругих и прочностных свойств, гетерогенность структуры, вязкая межслоевая прочность и т.д.) обусловили тот факт, что эти материалы хуже чем металлы, приспособлены к передаче сил (особенно сосредоточенных) с одного элемента на другой.

Прочность наиболее распространенных (клепаных, болтовых, резьбовых) соединений металлических элементов значительно превосходит прочность аналогичных соединений конструкций из композитов. Из-за невысокой прочности на смятие и срез может быть сведен на "нет" весь выигрыш в массе от применения в конструкции композитов. Если для металлов соотношение характеристик прочности при растяжении σ_B, смятии σ_{CM} и срезе τ_{CP} составляет соответственно 1,0; 1,3; 0,7, то для композитов однонаправленной структуры оно равно 1,0; 0,4; 0,15 [46].

Малое относительное удлинение ряда композитов (например, для углепластиков ε=0,5...1,5%) может привести к местному локальному разрушению композита уже в процессе клепки. Слоистость структуры композитов приводит к перегрузке прилегающих к клеевым швам слоев и часто вызывает их отрыв или расслоение.

Для полимерных КМ специфической проблемой является сохранение плотности стыка и обеспечение стабильности затяжки болтовых соединений из-за ползучести и релаксации напряжений в соединении.

Конструктивное оформление соединений композитных элементов отличается большим разнообразием и зависит как от назначения и предъявляемых требований, так и от технологических операций, с помощью которых они выполняются.

Каждое соединение обладает своими особенностями, преимуществами и недостатками и, выбор того или иного из них при проектировании изделий зависит от ряда факторов - характера и величины нагрузки, размеров деталей, физико-механических свойств материалов, условий эксплуатации, стоимости, технологической реализуемости, а также от специальных требований, например, по герметичности.

Любую конструкцию можно рассматривать как комбинацию листов, балок, стержней, оболочек, труб и других элементов, соединенных воедино. Комбинируя эти элементы, можно получить большое число различных по форме и размерам соединений (рис.4.10). В конструкциях из композитов соединительные узлы могут быть образованы с применением как одного из перечисленных видов соединений, так и их комбинации.

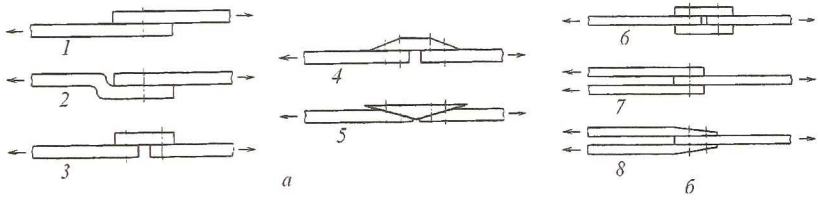


Рис.4.10. Типы соединений деталей из композитов:
а - простые соединения: 1 - обычное нахлесточное; 2 - нахлесточное с изгибом; 3 - стыковое с простой накладкой; 4 - стыковое со скошенной накладкой; 5 - соединения в ус с накладкой; б двойные соединения: 6 - стыковое с двумя накладками; 7 двустороннее нахлесточное; 8 - скошенное двустороннее нахлесточное

Элементы, образующие агрегат или изделие, могут быть соединены между собой с помощью клеевой прослойки, механического крепежа (болтов, заклепок и т.д.), выступов и углублений, имеющихся на поверхностях соединяемых деталей (например, резьбовые и клиновые соединения), а также сочетанием названных соединительных элементов (например, клей совместно с болтами, заклепками, резьбой). Особую группу составляют соединения, образуемые непосредственно в процессе формования композитных изделий. В качестве примера можно привести соединения фланцев, фитингов, окантовок с такими композитными деталями, как баллоны давления, стержни, трубы.

К металлическим КМ применимы в принципе все существующие методы соединений: точечная и диффузионная сварка, пайка, болтовые и клепаные соединения, клеесварные соединения и в некоторых случаях сварка плавлением.

Наибольшее число исследований по методам соединения КМ выполнено с бороалюминием, изучены все основные методы и отработаны процессы соединения этого материала как с самим собой, так и со сплавами на основе алюминия и титана [67].

Пайка бороалюминия. Разработано несколько технологических процессов пайки бороалюминия. Пайка высокотемпературными припоями производится в температурном интервале, не оказывающем разупрочняющего влияния на армирующие волокна. Паяные соединения, полученные этим методом, способны работать при температурах до 315°С. Было опробовано несколько припоев для низкотемпературной пайки. Припой состава 55% Cd, 45% Ag рекомендуется для рабочих температур до 90°С; он обеспечивает прочность соединения на срез, равную 90 МПа. Припой состава 95% цинка и 5% алюминия рекомендуется для рабочих температур до 315°С, при которых прочность соединения на срез составляет 30 МПа.

Тонкий слой никелевого покрытия толщиной 50 мкм, нанесенный на соединяемые поверхности, значительно улучшает смачиваемость и растекание припоя, повышает прочность соединения. С использованием припоя кадмий-серебро отработан эффективный и экономичный процесс изготовления тавровых, уголковых и других соединений, не требующих прессового и печного оборудования.

Нагрев при пайке осуществлялся с помощью мощных (1200 В) кварцевых ламп. Фиксация соединяемых элементов в процессе пайки проводилась специальными стальными державками. Паяные таким способом соединения устойчивы к термоциклированию в интервале температур от -198 до 95 °С.

Высокотемпературная пайка производится и с использование эвтектических припоев системы алюминий-кремний при температурах порядка 575-615 °С. Верхний предел работы такого соединения составляет не более 315°С. Технологический процесс может осуществляться как в вакууме, так и погружением в соляную ванну. Время пайки такими припоями должно быть сведено к минимуму из-за возможного разупрочнения волокон. Прочность соединения на срез довольно высока, более 100 МПа, и может превышать прочность межслоевого сдвига самого КМ.

Припои системы алюминий-кремний могут быть использованы и для соединения бороалюминия с титаном. Для получения прочного соединения в этом случае рекомендуется на поверхность титана наносить слой никеля.

Для пайки высокотемпературным припоем методом погружения используют обычную технологию и аппаратуру. Например, технология изготовления тавровой балки из листового боралюминия толщиной 1 мм, полученного методом диффузионной сварки, состояла из следующих операций; предварительного нагрева собранного узла до температуры 535°С, прогрева в течение 4 мин, погружения в соляную ванну с температурой 590°С на 45 с, промывки горячей водой для удаления следов соли и флюса.

Эвтектическая диффузионная пайка бороалюминия. Для соединения деталей из бороалюминия между собой или с элементами конструкций из алюминиевых сплавов возможно использование способа эвтектической диффузионной пайки, заключающегося в нанесении тонкого слоя второго металла, образующего в результате взаимной диффузии эвтектику с металлом матрицы. В зависимости от состава матричного алюминиевого сплава могут быть использованы следующие металлы, образующие эвтектику: серебро, медь, магний, германий, цинк. В результате дальнейшей диффузии металла покрытия в основной металл концентрация его снижается, и температура плавления в зоне соединения постепенно повышается, приближаясь к температуре плавления матрицы. Таким образом, паяные соединения способны работать при температурах, превышающих температуру пайки. Однако необходимость строгого регламентирования толщины покрытия, а также чистоты покрываемой поверхности, использование для получения таких покрытий метода вакуумного напыления делают этот процесс экономически нецелесообразным.

Дуговая сварка бороалюминия. Сварка плавлением, вообще говоря, малоэффективна для КМ и для боролюминия в частности, так как в зоне сварочной ванны происходит оплавление или разрушение волокон, в результате чего шов охрупчивается. Исключение составляют лишь контактная точечная и шовная сварки, сопровождающиеся лишь оплавлением матричного материала без разрушения волокон, но при этом необходимо строго регламентировать режим процесса сварки.

Точечная сварка бороалюминия является одним из наиболее надежных и дешевых способов соединения бороалюминиевых композиций между собой и с алюминиевыми сплавами. Высокое качество и надежность соединения объясняются тем, что волокна в месте сварки не перерезаются и не подвергаются длительному воздействию высоких температур. Для точечной сварки используют обычную аппаратуру. Режимы сварки легко контролируются, но наличие борных волокон резко снижает тепло- и электропроводность материала по сравнению с алюминием, волокна препятствуют свободному распределению расплава и формированию ядра. Тем не менее разработана технология точечной сварки бороалюминия, позволяющая получить прочные соединения. Например, одноосно армированные бороалюминиевые листы толщиной 0,5 мм удовлетворительно сваривались при воздействии двух импульсов сварки в противоположных направлениях. Это позволило сосредоточить сварочное ядро в средней части. Для предотвращения расщепления материала и выброса металла сварочный ток (количество выделяемой теплоты) был снижен, давление увеличено до 9000 Н при одновременном сокращении времени приложения давления.

Бороалюминиевые листы с перекрестным армированием толщиной 0,6 мм приваривали друг к другу примерно при тех же режимах, что и одноосноармированные.

Качество КМ оказывало существенное влияние на характер сварки и качество соединения. Основной дефект КМ расслоение. Если в материале имеется расслоение вблизи электрода, это вызывает сильный прожог материала, вплоть до сквозных отверстий. Расслоение во внутренних слоях и связанное с этим увеличение электросопротивления вызывает увеличение количества выделяемой теплоты, выжимание жидкого алюминия из сварочного ядра, продавливание и поломку волокон.

Средняя прочность сварной точки при сварке одноосноармированных бороалюминиевых пластин толщиной 0,5 мм между собой составила 90% от прочности бороалюминия эквивалентного сечения. Прочность соединения бороалюминия с перекрестным армированием выше по сравнению с одноосноармированными. Прочность многоточечного соединения составляет 70% прочности КМ.

Разработана также технология соединения боролюминия с титаном. Точечная диффузионная сварка сопротивлением осуществляется на стандартном оборудовании, обеспечивает получение высокопрочных соединений, способных работать при температурах от 20°С до 315°С. Эта технология открывает большие перспективы использования боролюминия совместно с титаном в элементах конструкции авиационной и космической техники.

Принципиальная схема и технологический процесс диффузионной точечной сварки почти не отличаются от точечной сварки плавлением. Разница лишь в том, что режим сварки подбирают таким, чтобы температура алюминиевой матрицы была близка температуре ее плавления (но несколько ниже ее). В результате в месте контакта образуется диффузионная зона толщиной от 0,13 до 0,25 мкм. Вместо обычного радиусного электрода используется электрод с плоским концом. Это позволяет снизить контактное давление и долю прямого нагрева бороалюминия. Нагрев бороалюминия осуществляется в основном посредством передачи теплоты нагреваемого в первую очередь титана, что облегчает контролирование процесса и сводит к минимуму вероятность оплавления алюминия.

Прочность сварных соединений и их надежность оценивались по результатам статических, усталостных испытаний и испытаний на ползучесть. Все образцы, испытанные на растяжение при температурах 20-120 °С, разрушались по основному материалу, с вырывом части образца вдоль волокон. При температуре 315°С образцы разрушались со сдвигом по месту сварки. Статическая прочность при температурах 20 120 °С образцов, сваренных внахлестку, превышала 50% прочности основного металла, при температуре 315°С со-

единение сохраняло около 80% прочности при 20°С, скорость ползучести при этом была незначительной; соединение выдерживало при этой температуре нагрузку 900Н на сварочную точку в течении 320ч.

Соединение бороалюминия с титаном может надежно работать при комнатной температуре и значительных нагрузках, составляющих 50% от прочности на разрыв, выдерживая более 10^6 циклов. Максимальная прочность сварной точки на срез составила 105 МПа.

Пайка и сварка углеалюминевых КМ. Разработаны основные методы соединения применительно к углеалюминию: пайка, точечная сварка, дуговая сварка плавлением.

Эксперименты показали возможность пайки углеалюминиевых композиций как между собой, так и с алюминиевыми сплавами, наилучшим припоем может служить сплав алюминия, содержащий магний и кремний. Несмотря на то, что прочностные свойства паяных соединений не изучались, судя по микроструктуре качество соединения очень хорошее.

Анализ методов соединения деталей из КМ в отечественных и зарубежных конструкциях ЛА показывает, что до 95% всех соединений приходится на долю механических точечных (клепаных, болтовых и штифтовых). Применение того или иного вида механического соединения зависит от типа нагрузки (статические или усталостные), надежности, легкости в производстве, стоимости и от специальных условий (необходимости получения съемных, подвижных или других видов соединений).

Однако необходимость получения отверстий под механическое точечное соединение приводит к перерезанию армирующих волокон и возникновению концентрации напряжений по периметру отверстия (рис. 4.11), которые во многом зависят от метода получения и качества поверхности отверстия[65].

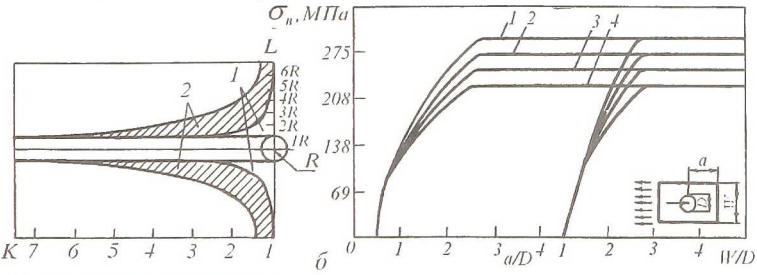


Рис 4.11. Напряжения в композитах:

а - распределение напряжений в окрестности отверстия в композите: 1 - изотропный стеклопластик; 2 однонаправленный боро- и углепластик, кевлар-эпоксидный; композиционный материал; К - коэффициент концентрации напряжений; L - расстояние от центра отверстия; R радиус отверстия; б напряжения смятия в направлении выкладки $\sigma_в$ (материал стеклотекстолит на основе ткани 181 и полиэфира) при напряжении на основе; 1, 2, 3, 4 - отношение диаметра отверстия к толщине образца

Клеевые соединения КМ применяются в самолетостроении еще с 1945 г. За прошедшее время значение этого вида соединений существенно возросло. Расширяются не только объемы использования, но и температурные интервалы, в которых эти соединения эксплуатируются. В современных условиях они находятся в пределах от -253 до +260 °С.

Из большого разнообразия клеевых соединений (рис.4.14) наибольшее распространение в конструкциях клеевых узлов получило, как наиболее экономичное, соединение внахлестку [43].

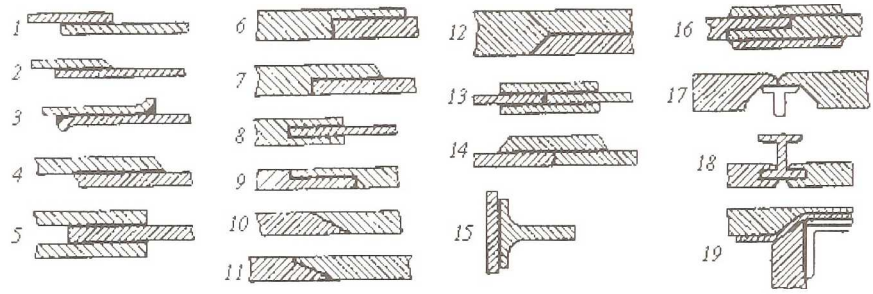


Рис.4.14. Модели клеевых соединений:
1 нахлестка простая; 2 нахлестка односкосная со скошенной кромкой; 3 нахлестка простая при отогнутых кромках склеиваемых образцов; 4 нахлестка двухскосная; 5 - нахлестка двусторонняя усиленная; 6 - нахлестка врезная простая; 7 нахлестка врезная односкосная усиленная; 8 - нахлестка двусторонняя; 9 - соединение двустороннее врезное; 10 соединение на ус: 11 соединение на ус врезное; 12 соединение двойное на ус; 13 соединение с двумя накладками; 14 соединение с накладками со скошенными кромками; 15 соединение торцевое с увеличенной площадью склеивания; 16 двусторонняя врезная нахлестка с накладками; 17 нахлестка с двутавром; 18 - нахлестка со швеллером; 19 - нахлестка с угольником

Прочность клеевого шва зависит от многих факторов: адгезии клея, зависимости свойств отвержденного клея от его толщины и других параметров.

При увеличении толщины слоя клея пропорционально увеличивается момент изгиба, при этом прочность на растяжение и сдвиг снижается. Максимальная прочность клеевого шва достигается при толщине клеевого слоя 0,1...0,2 мм.

В авиационно-космической технике для скрепления контактирующих поверхностей применяются специально разработанные клеи на основе полусинтетических или синтетических веществ: эпоксидные клеи, флексоны, фенольные клеи, полиуретановые, пластизольные и др. Выбор клея осуществляется исходя из конструктивных, технологических и экономических соображений.

Время образования адгезионной связи с помощью клея должно быть минимальным, поэтому ведутся активные работы по интенсификации процесса получения клеевых соединений. Для уменьшения времени нагрева используется высокочастотный ток и ультразвук.

Ультразвуковое нагревание при склеивании используется сравнительно недавно. Первые работы по ультразвуковому обогреву при склеивании показали его перспективность. Известны три метода склеивания с применением ультразвукового обогрева.

По первому методу клей обрабатывается ультразвуком, а затем наносится на субстраты традициоными способами.

По второму методу жидкий клей обрабатывается ультразвуком во время его нанесения на субстрат с помощью специальной установки. Этот метод способствует лучшему растеканию субстрата и дегазации клеевого слоя.

Третий метод применяется для обработки клеевой прослойки между склеиваемыми поверхностями. Характерной особенностью этого метода является кратковременное повышение температуры клея до 180 °С.

Методы склеивания с обогревом позволяют повысить производительность труда (благодаря ускорению процесса отверждения), а также добиться повышения прочности и надежности клеевых конструкций.

Ниже приведены сравнения преимуществ и недостатков механических и клеевых (адгезионных) соединений КМ [65].

1. После однократной нагрузки адгезионное соединение имеет меньшие остаточные деформации, чем аналогичные механические соединения.
2. Адгезионные соединения являются меньшими концентраторами, чем механические. В соответствии с этим возрастает предел прочности при остаточном нагружении.
3. По сравнению с механическими соединениями экономится до 25% массы вторичных структур (несущих элементов) и от 5 до 10% массы первичных структур (несущих элементов конструкций).
4. Адгезионные соединения могут быть спроектированы так, что будут иметь гладкую внешнюю поверхность и обладать минимальной возможностью для распространения трещин.
5. Могут быть легко соединены большие площади, причем стоимость такого соединения будет существенно ниже, чем механического.
6. С помощью адгезионных соединений могут быть объединены различные материалы, в том числе и с неодинаковыми коррозионными свойствами. Однако при проектировании таких соединений должны учитываться термодеформационные свойства исходных композитов.

К недостаткам адгезионных соединений нужно отнести.

1. Сопротивление ползучести при повышении температуры невелико для большинства типов адгезивов.

2. Конструкции с адгезионными соединениями должны обеспечивать минимальные раздирающие напряжения (не должны "работать на раздир").
3. Для адгезионных соединений затруднен неразрушающий контроль их качества.
4. После отверждения связующего соединение становится постоянным. Этот вид соединения не может быть использован для разъемных конструкций.
5. Эффективность полученных связей зависит от точности взаимного расположения деталей (аналогично сварке).
6. Надежность и долговечность адгезионного соединения определяются лабораторными методами, стоимость которых весьма высока.

Комбинированными называются соединения, образованные одновременно силовыми точками и непрерывным швом. К ним относятся такие соединения, как клееболтовые, клеезаклепочные, клеерезьбовые и т.п. Применение при сборке элементов одновременно двух методов соединения обусловлено стремлением иметь более прочный в механическом отношении шов, повысить его ударные и вибрационные характеристики и использовать герметизирующие свойства клеевых прослоек.

Например, в клепаных самолетных конструкциях клеевая пленка поглощает вибрации, ослабляет действие ударных нагрузок и снижает вероятность усталостного разрушения. При нагружении комбинированного соединения клеевая прослойка воспринимает часть нагрузки, разгружая силовую точку. Такое перераспределение напряжений уменьшает их концентрацию у границ силовой точки, что приводит к повышению прочности конструкции. В то же время наличие в клеевом шве жестких связей в виде болтов или заклепок устраняет серьезный недостаток клеевых соединений низкую работоспособность при неравномерном отрыве.

Главная цель применения клеевой прослойки в комбинированных соединениях заключается в повышении не только статических, сколько динамических свойств соединений.

Особую группу составляют соединения различных композитных элементов, образуемые непосредственно в процессе изготовления последних. К этим соединениям относятся заформовка фланцев в различные оболочки и трубы, фитингов в стержневые трубчатые элементы, соединительных втулок в лонжероны лопастей вертолетов и т.п. Перечисленные переходные элементы (фланцы, фитинги и т.д.), предназначенные для передачи больших сосредоточенных нагрузок, обычно изготавливаются из металлов и соединяются с ответными металлическими изделиями традиционными способами.

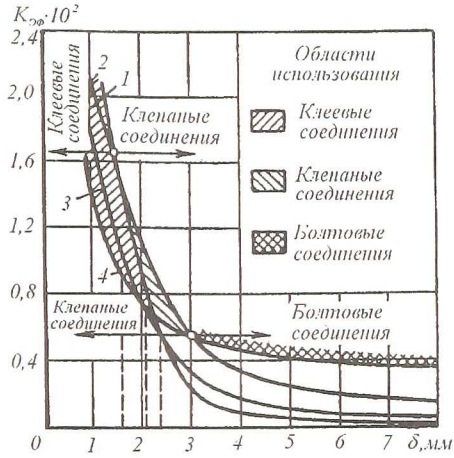


Рис.4.15. Области эффективного использования различных видов соединений:
1 - клеевые; 2 - клепаные; 3 - клееклепаные; 4 - болтовые

На рис.4.15 показаны области эффективного использования различных видов соединений в зависимости от изменения толщины соединяемых элементов [40].

Экспериментальные исследования прочности механических и комбинированных соединений углепластиков и стеклопластиков показывают влияние начальных технологических напряжений, возникающих от натяга при постановке болтов и заклепок, на концентрацию напряжений около отверстий и прочность соединений.

Исследовалась прочность образцов в виде пластин с отверстиями, заполненными заклепками или болтами, и односрезные нахлесточные соединения. В качестве материалов применялся углепластик марки КМУ 1у и стеклопластики различных марок ВФТ - 2сТ; КАСТ - В; ТСУ - 8/3 - ВМ78.

Натяг изменялся за счет применения заклепок из различных материалов. Затяжка болтов осуществлялась тарированными ключами. Испытания проводили при статических и переменных нагрузках с частотой нагружения 600 и 2800 цикл/мин.

По результатам эксперимента строили корреляционные зависимости и определяли меру индивидуального рассеяния опытных данных (рис.4.16, 4.17) [40]. Анализ результатов испытаний показывает, что при статическом и переменном нагружении прочность соединений композитов с увеличением натяга $\overline{u}_r$ падает, а эффективный коэффициент концентрации напряжений увеличивается.

Итак наиболее распространенным в настоящее время является метод соединения деталей из КМ с помощью механических точечных соединений, который имеет ряд преимуществ перед другими благодаря легкости контроля, простоте сборки и разборки, высокой сопротивляемости нагрузкам, вызывающим отслаивание и возникновение ползучести при повышенных температурах, надежности и низкой стоимости.

Перспективным путем повышения прочности таких соединений является создание комбинированных клееточечных соединений, которые имеют в 2-3 раза более высокие прочностные показатели, чем клеевые и механические в отдельности.

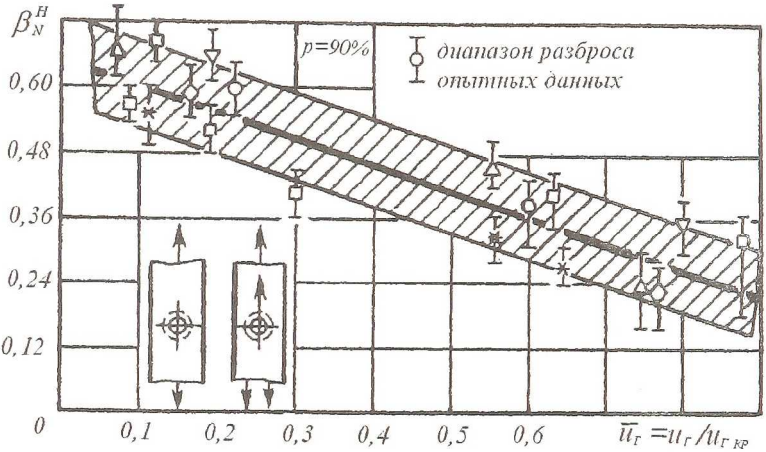


Рис.4.16. Зависимость эффективного коэффициента усталостной прочности соединения от натяга: болтовые соединения:

□ - стеклопластик ВФТ-2СТ, О стеклопластик СП-6; клеевые соединения: Δ - углепластик КМУ-IV, - стеклопластик ВФТ-2СТ, * стеклопластик КАСТ-В, ◊ - стеклопластик СК-9А, ∇ - стеклопластик ТСУ-8/3-ВМ7

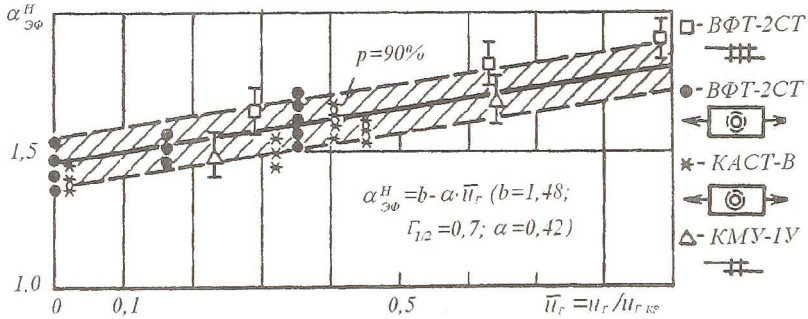


Рис.4.17. Зависимость эффективного коэффициента концентрации напряжений от натяга

Однако, для наиболее полной реализации прочностных характеристик КМ при их соединении в пакеты применение обычных заклепок и традиционных способов клепки недопустимо из-за возможности разрушения композиции в процессе образования механического точечного соединения.

На рис.4.18 представлены данные по изменению долговечности клепаных соединений углепластика марки КМУ-1у, полученных разными методами с использованием заклепки из материалов с разной прочностью.

Наибольший эффект обеспечивает клепка давлением с раскаткой (кривая 3) заклепок из стали марки 1Х18Н9Т с прочностью σ_B=720 МПа.

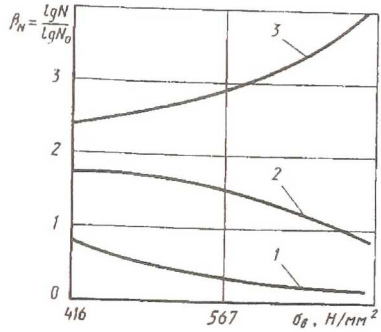


Рис.4.18. Зависимость долговечности соединений от метода клепки и прочности материала заклепки:

1 клепка прессовая (заклепки обыч-ные); 2 клепка прессовая (заклепки полупустотелые); 3 - клепка давлением с раскаткой (заклепки обычные)

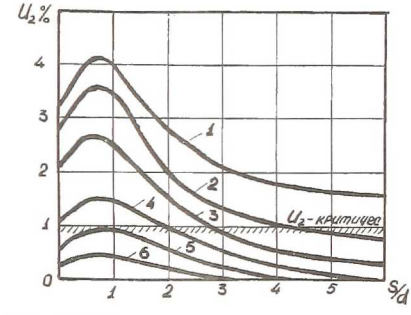


Рис.4.19. Зависимость натяга заклепок в конструкциях из КМ от отношения:

1 - ξ=0,35; 2 - ξ=0,55; 3 - ξ=1,0; 4 - ξ=1,35; 5 - ξ=1,7; 6 - ξ=2,5

Как известно, при клепке пакетов из однородных металлических материалов заклепка устанавливается в отверстие с зазором, а затем в процессе формирования замыкающей головки полностью заполняет его. При этом наблюдается увеличение диаметра отверстия на 2-8%.

В силу специфических свойств КМ (анизотропии, малой степени деформации, низкой прочности на смятие, невысокой твердости, склонности к хрупкому разрушению) допустимые радиальные деформации при их клепке в пакете ограничиваются значениями, которые в несколько раз меньше, чем у однородных металлических материалов. Так, для клепки смешанных пакетов толщиной 5 мм и более, где детали из КМ типа углепластик имеют толщину не менее 3 мм, при условии образования непотайной замыкающей головки заклепки из алюминиевого сплава обычной конструкции, раздача отверстия, при котором возникает разрушение КМ, т.е. критический натяг u_{rKP}≈1%. На рис.4.19 показана зависимость натяга u_r% заклепок в конструкциях из КМ от соотношения *s/d* и $\xi = \sigma_B^{BKM} / \sigma_B^{3}$, где *s* толщина пакета; *d* - диаметр заклепки; σ_B^{BKM} предел прочности волокнистого КМ; σ_B^{3} - предел прочности материала заклепки [38].

При натяге $u_r > u_{rKP}$ сжимающие напряжения, неравномерные по толщине пакета, создают в КМ вокруг отверстия сложное напряженно-деформированное состояние, что существенно снижает прочность и долговечность механических точечных соединений. Увеличение зазора между отверстием в пакете и заклепкой с целью уменьшения деформаций КМ также приводит к снижению выносливости соединений. Результаты сравнительных испытаний соединений на выносливость, в которых отверстия выполнены сверлением в пакетах из КМУ-3, показаны на рис.4.20.

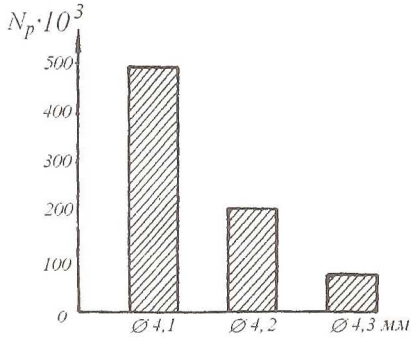


Рис.4.20. Влияние диаметра отверстия на выносливость соединения из КМ

Таким образом, при образовании заклепочного соединения на пакетах, содержащих КМ, необходимо соблюдение строго определенных деформационно-силовых условий на границе контакта стержня заклепки и стенок отверстия, для чего необходимо обеспечение минимального зазора между ними и отсутствия больших сжимающих напряжений в процессе клепки, действующих на КМ по периметру отверстия. Последнее возможно при условии выполнения отверстий под механическое точечное соединение в заготовках из КМ высокой точности и при применении способа клепки, позволяющего управлять раздачей стержня заклепки на толщине пакета.

4.4. Подготовительные операции перед сборкой

Особенностью КМ является возможность совмещения технологического процесса получения материала с технологическим процессом изготовления готового изделия относительно высокой точности и качества поверхности. Однако остается весьма существенным объем механической обработки при подготовке изделий к сборке и в процессе самой сборки. Для получения окончательной формы и размеров деталей и готовых изделий из КМ приходится применять почти все существующие методы механической обработки и штамповку.

Механическая обработка необходима для обрезки технологического припуска, который остается почти после всех методов формования деталей из КМ, подрезки торцов, обработки сопрягаемых поверхностей оболочек, получения необходимых канавок, например, при установке уплотняющих элементов, прорезки пазов, вырезки окон и люков, получения различного рода уступов и подсечек, образования отверстий разнообразной конфигурации для эксплуатационных целей и под крепежные элементы.

Наиболее часто при этом применяют операции механической обработки резанием КМ, процесс, который обладает рядом специфических особенностей, отличающих его от аналогичной обработки металлов. Эти особенности сводятся к следующим [66].

1. Ярко выраженная анизотропия свойств материалов. Если металлы, имеющие кристаллическое строение, с определенным допущением можно считать изотропными, то КМ, наполнителем в которых являются волокнистые материалы различного состава обладают

анизотропией. Это определяет различие процесса резания, в частности стружкообразования, при обработке вдоль и поперек армирующих волокон. Существенным образом схема армирования будет влиять и на качество получаемой поверхности, поэтому при разработке технологической операции следует учитывать и направление обработки относительно направления армирования.

2. Относительная сложность получения высокого качества поверхности. Обработку КМ необходимо всегда производить острозаточенным инструментом. При больших затуплениях инструмента из-за низкой адгезии связующего с армирующим волокном при увеличении сил резания образуются трещины между волокном и связующим, происходят выкрашивания связующего с обрабатываемой поверхности изделия, особенно в местах входа и выхода инструмента, что, естественно, сказывается на качестве обработки. Слоистая структура приводит к тому, что при повышенных износах инструмента происходит расслоение материала. Кроме того, при перерезании армирующих волокон, особенно, при перекрестном армировании, наблюдается разлохмачивание перерезанных волокон, что ухудшает качество обработанной поверхности и заставляет иногда применять зачистку наждачной бумагой.
3. Высокая твердость наполнителя. Она у некоторых КМ вызывает целый ряд трудностей их обработки. Например, у материалов на основе волокон бора микротвердость составляет 35000-45000 МПа, что превосходит твердость таких инструментальных материалов, как быстрорежущие стали (7800-9000 МПа) и твердые сплавы (19000-34000), и соизмерима с микротвердостью сверхтвердых материалов натуральных алмазов (98100 МПа), синтетических алмазов АС6 (89000 МПа) и Эльбора-Р (84000 МПа). Поэтому для обработки таких материалов могут быть применены только сверхтвердые материалы (СТМ), причем и в этом случае проблема обработки не снимается, ибо соотношение микротвердостей инструментального и обрабатываемого материалов составляет всего 2,5, тогда как для эффективного осуществления процессов резания соотношение микротвердостей должно составлять 4-6.
4. Низкая теплопроводность КМ. Теплопроводность КМ на полимерной основе в несколько сот раз меньше, чем у металлов. Это обуславливает слабый отвод теплоты со стружкой и в обрабатываемое изделие, поэтому при обработке полимерных КМ основная доля теплоты отводится через режущий инструмент. Например, расход теплоты при обработке полимерных КМ распределяется следующим образом: в инструмент 90%, в стружку - 5%, в обрабатываемый материал 5%. В то же время при обработке металлов порой до 90% теплоты уносится со стружкой и только 10% поглощается деталью и инструментом. Такое перераспределение

расходной части теплового баланса накладывает определенные условия на применяемый режущий инструмент, который должен интенсивно отводить выделяющуюся в зоне резания теплоту, т.е. принудительно охлаждаться.

5. Абразивное воздействие наполнителя. Стеклянные, борные или угольные волокна в КМ обладают высокой твердостью и абразивной способностью при их механической обработке резанием. Это приводит к абразивному износу инструмента, который при обработке некоторых КМ, например бороплastиков и бороалюминия, имеет преобладающее значение перед другими видами износа. При этом стойкость инструмента, даже твердосплавного, на несколько порядков ниже, чем при обработке традиционных однородных конструкционных материалов.
6. Деструкция полимерного связующего при резании. Деструкция происходит за счет действия больших локальных напряжений и высокой температуры, повышающей теплостойкость полимера, и заключается в том, что происходит массовый разрыв химических связей у молекулярных цепей полимера, образуется большое число свободных макрорадикалов, обладающих избыточной энергией. В результате этого образуется вязкотекучий в микрообъемах полимер, являющийся поверхностно-активным веществом. Мигрируя по поверхности механически напряженного режущего клина инструмента и по дефектам его поверхности, деструктированный полимер снижает поверхностную энергию металла, что облегчает отрыв от его поверхности отдельных микро- и макрочастиц. В результате этого возникает механо-химический адсорбционный износ инструмента как одна из составляющих его суммарного износа. Кроме того образуется деструктированно-диспергированный слой, претерпевший механические превращения полимера и диспергирование наполнителя, который приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик изделия из полимерных КМ. В результате деструкции полимера обильно выделяются летучие вещества, которые являются токсичными и вызывают отравления у рабочих.
7. Высокие упругие свойства КМ. Из-за высоких упругих характеристик КМ происходит упругое восстановление слоя материала, лежащего под поверхностью резания. Это приводит к увеличенным площадкам контакта инструмента и обрабатываемого материала, и к повышенным значениям сил резания на задней поверхности. Происходит быстрый износ инструмента путем округления режущей кромки, т.е. ее притупление. Упругое восстановление обработанной поверхности следует учитывать и при оценке точности. Так, например, при сверлении отверстий в КМ диаметр полученного отверстия на 1-1,5% меньше диаметра инструмента.

8. Технологический критерий износа инструмента. Допустимый износ инструмента при обработке КМ всегда ниже, чем при аналогичной обработке металлов и оценивается по технологическим факторам, определяющим качество поверхности. Это такие характерные дефекты поверхности КМ как сколы, расслоения, разлахмачивания, прижоги и при их отсутствии определенный уровень шероховатости поверхности.
9. Низкая теплостойкость КМ. Существенной особенностью большинства полимерных КМ является их низкая теплостойкость. В зависимости от типа связующего теплостойкость этих материалов составляет 160-300 °С. При температурах, выше указанных, происходит при резании выгорание связующего, на поверхности обработанной детали появляются прижоги. Поэтому уровень температур в зоне резания должен быть значительно меньше, чем при обработке металлов. Это усугубляется еще и тем, что в большинстве случаев не допускается применение СОЖ. Как известно, полимерные КМ обладают таким свойством, как влагопоглощение, поэтому применение СОЖ во многих случаях недопустимо.
10. Специфика процесса стружкообразования. При обработке резанием КМ иначе, чем у металлов, происходит процесс стружкообразования, что объясняется в первую очередь разной их структурой. Высокие упругие свойства материала определяют процесс его разрушения, который носит хрупкий характер. При этом выделяются мельчайшие частицы наполнителя, смешанного со связующим, а также летучие, порой токсичные вещества, которые поднимают вопросы повышенных требований техники безопасности и производственной санитарии.

Перечисленные особенности обработки резанием КМ показывают, что простой перенос закономерностей процесса резания металлов на эти материалы недопустим, а требуются новые технологические процессы, которые обеспечили бы экологическую чистоту производства и требуемое качество обрабатываемых деталей.

Разделительной штамповкой осуществляют самые разнообразные операции на изделиях из КМ: обрезка припуска, отрезка, вырубка, пробивка, подрезка, разрезка, зачистка и т.д. Причем в отличие от механической обработки резанием операции разделительной штамповки имеют преимущество: повышение производительности труда, так как процесс разделения осуществляется на всей длине заготовки за один рабочий ход машины без дополнительных операций; отсутствуют какие-либо вредные выделения в окружающую среду, отход представляет собой крупные частицы КМ, что не требует дополнительных затрат для выполнения мероприятий по технике безопасности и охране труда. Например, в большей части производства листовых стеклопластиков типа ЖСП

первичный продукт получается с относительно грубыми кромками, поэтому применяются обрезные операции для отделки кромок листов.

Неоднородность структуры ЖСП, состоящего из стеклонаполнителя и смолы, которые сравнительно слабо связаны между собой, приводит при механической обработке резанием к расслаиванию, разлахмачиванию и вырывам на обрабатываемой поверхности. Хрупкость стекловолокна и слабое адгезионное взаимодействие со смолой приводят при обработке к обильному выделению стеклянной пыли, вредной для здоровья людей, обслуживающих оборудование.

Низкая теплопроводность ЖСП отрицательно влияет на стойкость инструмента, способствуя образованию высокой температуры в зоне резания и выходу инструмента из строя.

Интерес представляют разработанные технологические процессы обрезки припуска по контуру толстолистовых плит из ЖСП методом разделительной штамповки.

Технологический процесс обработки контура деталей из ЖСП толщиной до 15 мм состоит из следующих операций: разметки контура детали на плоскости заготовки; фиксации заготовки в инструментальном штампе; черновой обрезки припуска с последующей зачисткой; контроля качества поверхности разделения.

На плоскости заготовки инструментальным методом наносится контур детали. Затем заготовка устанавливается в штамп, обеспечивая при этом совмещение "риски" с плоскостью прижима, и фиксируется силой 0,75-0,8 от прочности ЖСП на сжатие перпендикулярно волокнам (рис. 4.21,а). Далее в обойму вставляется отрезной блок, состоящий из ножей черновой и чистовой обрезки. Нож черновой обрезки имеет толщину 20 мм с углом заточки 40°, что обеспечивает его прочность. Зачистной нож, для повышения прочности, имеет двойной угол заточки - 41° и 30°.

При внедрении ножа черновой обрезки в обрабатываемый материал (рис.4.21, б) образуется разрушающая трещина, которая прорастает на всю толщину КМ. Траектория роста трещины может отклоняться как в одну, так и в другую сторону, что не сказывается при дальнейшей обработке на качестве рабочей поверхности детали. На рабочей плоскости ножа черновой обрезки имеется фигурный паз, нижний край которого, после перерезания обрабатываемого материала на всю толщину, устанавливается на 1-2 мм выше режущей кромки зачистного ножа (рис.4.21,в), обеспечивая тем самым подпор волокон наполнителя с торца. Далее под действием силы обрезки происходит синхронное перемещение обоих ножей в сторону нижней плоскости заготовки. Нож чистовой обрезки, перерезая слои наполнителя, сдвигает их в область фигурного паза ножа черновой обрезки (рис.4.21,г). Процесс обрезки заканчивается при достижении режущей кромкой зачистного ножа нижней плоскости заготовки.

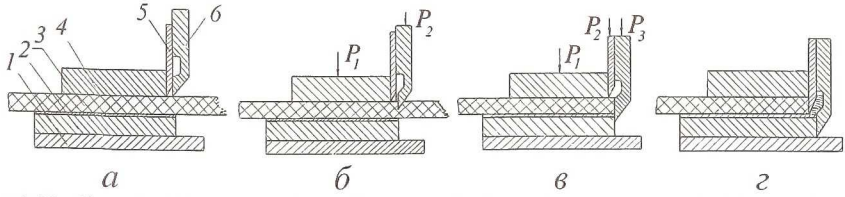


Рис.4.21. Стадии обрезки технологического припуска на плитах из полимерных КМ тол-щиной до 15 мм:

1 - основание; 2 - нож неподвижный; 3 - плита из полимерного КМ; 4 - прижим; 5 - нож зачистной; 6 - нож черновой

Контроль качества поверхности разделения осуществляется на прямолинейность и перпендикулярность контура, наличие микротрещин и утяжки волокон на плоскости разделения.

Технологический процесс обработки контура деталей из толстолистовых ЖСП толщиной свыше 15 мм состоит из следующих операций: разметки контура детали на плоскости заготовки; фиксации заготовки в механизме прижима; рассечения припуска на равные по толщине элементы клиновым инструментом; нагружения отдельного элемента припуска со стороны торца; перерезания отдельного элемента припуска отрезным ножом с последующим перенесением нагрузки сжатия на рядом стоящий элемент и дальнейшим внедрением отрезного ножа вглубь обрабатываемого материала; контроля качества поверхности разделения.

Заготовку с размеченным контуром размещают и фиксируют вертикально в прижиме (рис.4.22,а). Затем начинают внедрять клиновой инструмент, который останавливают при достижении вершины трещины зоны на Δl над плоскостью разделения (рис.4.22, б). Значение Δl назначается исходя из физико-механических свойств обрабатываемого ЖСП и составляющих его компонентов. Процесс внедрения клинового инструмента повторяют столько раз, на какое число отдельных элементов необходимо расслоить припуск. Это позволяет представить толстолистовую заготовку из ЖСП в виде пакета, состоящего из отдельных пластин, имеющих свободную поверхность между собой в виде межслойной трещины (рис.4.22, в). Затем, во избежание преждевременного отрыва неперерезанных еще слоев наполнителя ЖСП, припуск нагружают в направлении, перпендикулярном плоскости разделения (рис.4.22, г). После этого производят внедрение отрезного ножа, причем нож перерезает элемент толщиной ΔS с последующим выводом его из зоны резания, что позволяет прикладывать к отрезному ножу силу значительно меньшую, чем при перерезании материала по максимальной толщине.

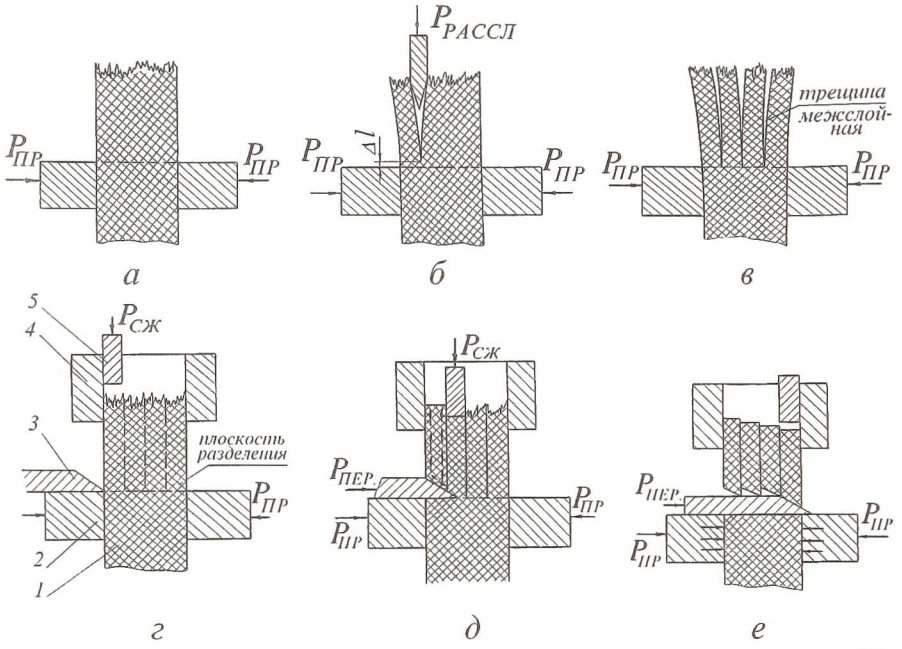


Рис.4.22. Стадии обрезки технологического припуска на плитах из полимерных КМ толщиной 15 мм:
1 - заготовка; 2 - прижим; 3 - нож отрезной; 4 - обойма; 5 - пластина запорная

Перерезанный элемент припуска за счет вертикальной составляющей сил резания выводят из зоны резания, и процесс обрезки повторяют (рис.4.22, д). Аналогичные действия производят до полного перерезания припуска на всю толщину ЖСП (рис.4.22,е).

Для сборки и стыковки толстолистовых деталей из ЖСП между собой был разработан метод формирования ступенчатого выступа на торце и спроектирована оснастка для его реализации. Ступенчатый выступ формируется следующим образом. Заготовку с размеченным контуром "ступеньки" фиксируют прижимом *2* таким образом, что граница выступа лежит в горизонтальной плоскости верхнего края прижима (рис.4.23, а). Затем вдоль слоев наполнителя, по месту границы "ступеньки", внедряют спецнож *3*, имеющий уступ, на котором укреплена прокладка *4* из эластичного материала (рис.4.23, б). Внедрение спецножа *3* прекращают по достижении межслойной трещиной плоскости разделения. Эластичная прокладка *4* выполняет функцию подпора, предотвращающего отрыв волокон и образование дефектов на горизонтальной полочке "ступеньки" (рис.4.23, в). Далее по месту образования горизонтальной полки "ступеньки" внедряют отрезной нож *5* до контакта его режущей кромки с межслойной трещиной, в процессе чего образуется "ступенька" необходимых размеров (рис.4.23, г).

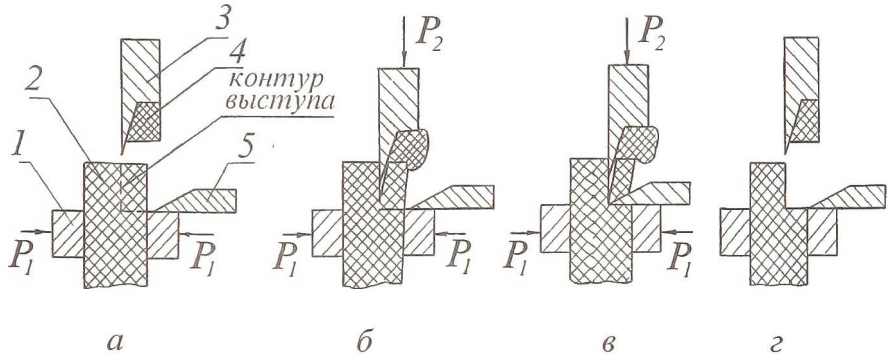


Рис.4.23. Формирование ступенчатого выступа на торцах деталей из полимерных КМ: 1 - прижим; 2 - заготовка; 3 - спецнож; 4 - прокладка упругая; 5 - нож отрезной

Как отмечалось выше, основными способами соединения деталей из КМ с элементами конструкций ЛА являются механические точечные (заклепочные и болтовые) и комбинированные соединения (клеезаклепочные и клееболтовые). Для образования механического точечного соединения необходимо получить отверстия, качество которых во многом определяет прочность и долговечность конструкции в целом.

Наиболее распространенным и изученным способом получения отверстий под механические точечные соединения является сверление, которое не требует использования специальной сложной оснастки и инструмента, при этом производительность процесса в основном зависит от физико-механических свойств материала соединяемых деталей, диаметра отверстий и вида применяемого оборудования. Сверление полимерных КМ производится специальными твердосплавными сверлами с широкими полированными канавками. Сверла должны быть хорошо заточены, в процессе сверления желательно обеспечить удаление мелкой стружки и пыли, так как операция чаще всего проводится сухим методом.

Для большинства полимерных КМ после сверления возникает усадка, поэтому инструмент должен быть слегка увеличенного размера для большей точности выполнения операции. Наилучшие результаты дает сверление полимерных КМ, когда место сверления обжимают зажимными приспособлениями с соосными отверстиями для входа и выхода сверла, что исключает выкрашивание и разлахмачивание КМ по периметру сверла.

При сверлении бороалюминия и бороластика удовлетворительные результаты можно получить только при использовании сверла с алмазным покрытием. Сверление смешанных пакетов (КМ-металл) в процессе сборки затруднено, металлическая стружка значительно выкрашивает и разбивает отверстие, недопустимо

ухудшает его качество. При сверлении же со стороны металла осевая сила резания приводит к перенапряжению и разрушению нижних слоев КМ. При этом помимо сверления необходимо применять дополнительные операции по рассверливанию и развертыванию отверстий. Только сверлением алмазными сверлами с помощью специальных высокоскоростных дрелей (n=10000-20000 мин$^{-1}$) с отсосом пылевидной стружки можно получить качественные отверстия. Наряду с использованием алмазного инструмента эффективным при сверлении бороплластиков оказывается применение ультразвуковой техники.

Однако сверление отверстий имеет серьезные недостатки: низкая стойкость сверл и дороговизна их изготовления с алмазным покрытием; необходимость применения охлаждающей среды и специального оборудования; выделение пылеобразных и стружкообразных компонентов в окружающую среду; необходимость выполнения процесса в 2-3 перехода и применение дополнительных операций зенкерования и развертывания; выкрашивание кромок отверстия и разрушение армирующих волокон в зоне реза; разлахмачивание и расслоение КМ по периметру отверстия; необходимость удаления заусенцев. Более высокое качество отверстий в КМ получают при использовании электроэрозионной прошивки. Точность отверстий, полученных этим способом, определяется точностью изготовления электродов, а шероховатость поверхности зависит от режимов. Однако, получение отверстий электроэрозионной прошивкой имеет недостатки: процесс выполняется в охлаждающей среде и сопровождается интенсивным газовыделением; обрабатываются только металлические КМ; ограничены габаритными размерами ванны размеры обрабатываемых деталей; исключена возможность применения процесса для получения отверстий в процессе сборки.

Способ пробивки отверстий в заготовках из КМ в инструментальных штампах обладает рядом преимуществ: нет стружки и пыли (отход в виде кругляка); высокая производительность; отсутствие термического воздействия на материал по периметру разделения; отсутствие на поверхности разделения в процессе пробивки крутящих моментов; возможность автоматизации. Применяя традиционные методы пробивки, возможно получение неудовлетворительного качества отверстий, что обусловлено появлением зоны дробления волокон, трещин в связующем материале, утяжки, скола и эллипсности.

Значительный интерес представляет собой технологический процесс образования отверстий с лунками под винтовые соединения в деталях из КМ (типа ЖСП) толщиной от 10 до 30 мм методами штамповки в инструментальных штампах на гидравлических и механических прессах двойного действия.

Эскиз типовой плиты из ЖСП показан на рис. 4.24.

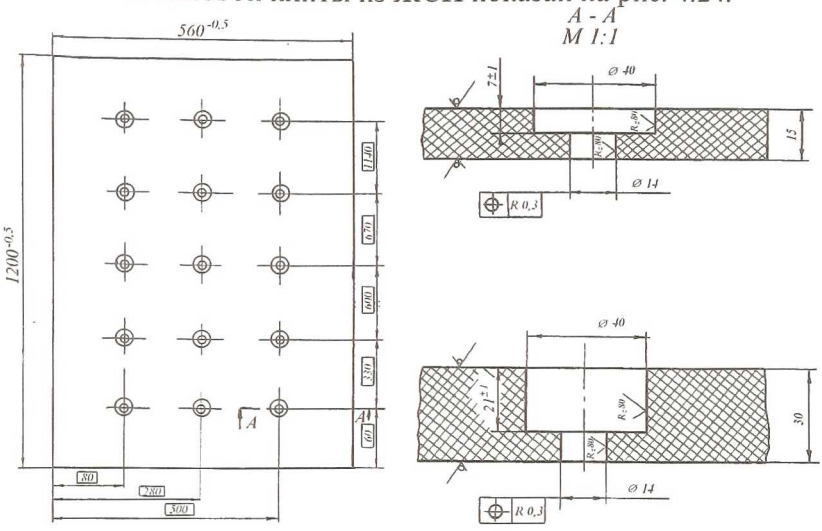


Рис.4.24. Эскиз типовой плиты из ЖСП

Требования к качеству выполнения отверстий с лунками под болтовые соединения в плитах из ЖСП заключаются в следующем: смещение центров отверстий относительно координат не более 0,3 мм; несоосность отверстия и лунки под головку винта не более 0,3 мм; непараллельность опорной поверхности лунки относительно нижней плиты не более 0,3 мм на диаметре лунки; неперпендикулярность оси пробитого отверстия относительно нижней поверхности плиты не более 0,2 мм при толщине плиты 30 мм; шероховатость поверхностей отверстия и лунки Rz=80 мкм.

Расслоение материала плит по лункам в зоне перехода от опорной к цилиндрической поверхности не допускается.

Технология процесса образования одинарных отверстий с лунками заключается в следующем.

1. Разметка местоположения отверстий, которая осуществляется засверливанием непосредственно по спец-шаблону.
2. Сверление глухого направляющего отверстия диаметром 4±0,1 мм, которое производится пневмодрелями на глубину не более 5,0±1 мм (рис.4.25).
3. Запрессовка в направляющем отверстии ступенчатого штифта, которая производится вручную с помощью молотка. Во избежание выпадания ступенчатого штифта из направляющего отверстия диаметр меньшей ступени штифта изготавливается с превышением фактического диаметра направляющего отверстия не менее чем 0,025 мм (рис.4.26).

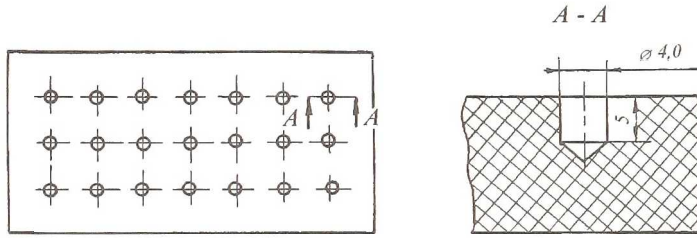


Рис.4.25. Разметка и сверление направляющих отверстий в плитах из ЖСП

Установка детали из ЖСП в рабочую зону штампа, достигается за счет выполнения большой ступени штифта по посадке движения по отношению к диаметру матрицы (рис.4.27).

После операции получения чистового отверстия, ступенчатый штифт извлекается из отверстия матрицы, очищается от отхода ЖСП и используется вновь.

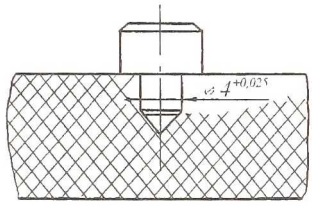


Рис.4.26. Запрессовка в направляющее отверстие ступенчатого штифта

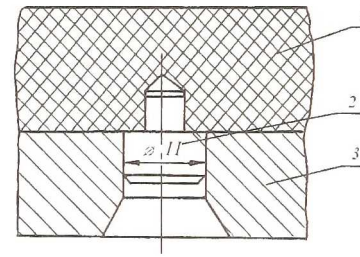


Рис.4.27. Установка плиты из ЖСП на матрицу штампа:
1 - плита из ЖСП; 2 штифт; 3 матрица штампа

5. Пробивка чистового отверстия ступенчатым пуансоном.

Особенностью получения чистовых отверстий за один ход в деталях из КМ является накопление обрабатываемым материалом значительной упругой энергии. В результате после удаления пуансона из чистового отверстия на стенках последнего как по толщине детали, а также и по периметру имеют место различного рода дефекты в виде расслоений, вырывов, трещин и т.п. Наиболее рациональным в связи с этим является метод пробивки отверстий ступенчатым пуансоном (рис.4.28, а).

Пробивка чистового отверстия ступенчатым пуансоном с 2-мя режущими кромками, предусматривает формирование предварительного отверстия меньшей по диаметру ступенью пуансона (рис.4.28, б), при этом глубина и характер имеющих место дефектов не представляют опасность для стенок чистового отверстия. После чего дальнейшим движением ступенчатого пуансона производят зачистку стенок предварительного отверстия (рис.4.28, в).

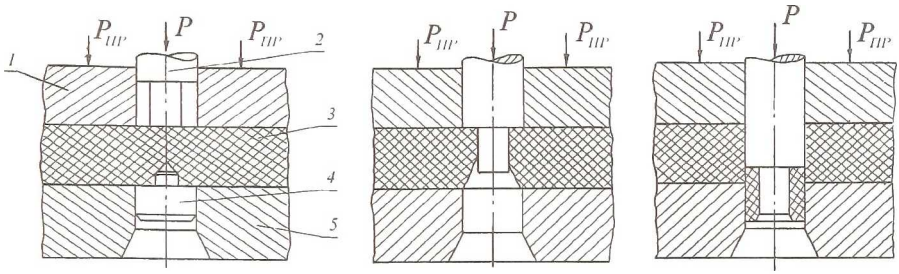


Рис.4.28. Пробивка чистового отверстия ступенчатым пуансоном:
1 - направляющая плита; 2 - ступенчатый пуансон; 3 - плита из ЖСП; 4 - штифт; 5 - матрица

Фиксация детали на матрице осуществляется с помощью пресса с гидравлическим или пневматическим приводом через направляющую плиту. Удельные силы сжатия детали с целью устранения возможности разрушения упрочняющих волокон КМ 0,7-0,8 от разрушающего напряжения материала на сжатие по толщине.

6. Установка в чистовом отверстии цилиндрического стержня с натягом.

Целью установки цилиндрического стержня в чистовом отверстии с натягом является как обеспечение прочности стенок отверстия на заданном участке толщины детали (оговаривается чертежом), а также создание концентратора напряжений в обрабатываемом материале, на рабочей плоскости (диаметр АВ) цилиндрического стержня (рис.4.29).

Перед штамповкой лунки, выступающая часть стержня устанавливается в отверстие на плите штампа с целью точной фиксации пробитого отверстия (рис.4.30).

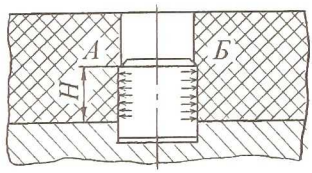


Рис.4.29. Схема создания концентратора напряжений в обрабатываемом материале

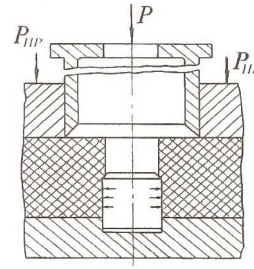
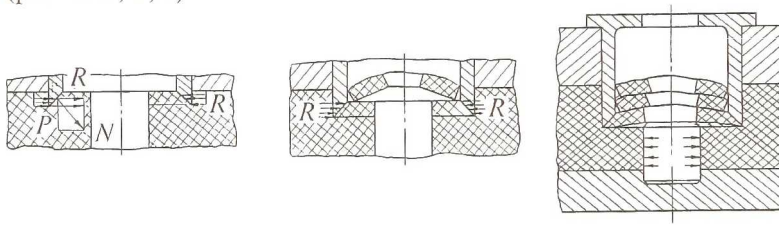


Рис.4.30. Установка плиты из ЖСП на штампе

7. Штамповки при получении лунки гарантируется следующими ос-новными факторами: слоисто-волокнистой структурой обрабатываемого материала; наличием свободного объекта в виде части чистового отверстия, не занятого цилиндрическим стержнем; сравнительно низкой межслойной прочностью на сдвиг обрабатываемого материала; практически отсутствием опережающего движения разрушающей трещины по отношению к движению инструмента. Физическая картина реализации способа штамповки лунки состоит в следующем: при внедрении пуансона в обрабатываемый материал осуществляется перерезание слоев композиции от действия нормальной силы N (рис.4.31, а). Вместе с тем, наличие конической полости в пуансоне предопределяет появление реальной составляющей силы деформирования на боковую поверхность перерезанного слоя R. Причем радиальная составляющая силы деформирования вырастает с увеличением глубины внедрения пуансона в деталь. Действие радиальной составляющей силы на боковую поверхность перерезанного слоя вызывает отрыв его по всей контактируемой поверхности от остальных слоев с прогибом в коническую полость пуансона (рис.4.31, б, в).



а *б* *в*

Рис.4.31. Стадии процесса штамповки лунок

8. Удаление цилиндрического стержня из чистового отверстия детали производится или механическим путем на используемом оборудовании или вручную, легкими ударами молотка по стержню.
9. Контроль качества отверстий должен включать обязательную проверку: размеров и овальности; неперпендикулярности оси отверстий поверхности детали; несоосности отверстия и лунки; непараллельности опорной поверхности лунки относительно нижней поверхности плиты; наличия отслоений, выкрашивания связующего, отсутствия трещин по кромкам отверстия.

Из рассмотренных способов лучшие результаты дает динамическая пробивка (со скоростью более 15 м/с) в инструментальном штампе при наличии прижима и подпора. Зона дробления волокон находится в пределах зазора. Опыт пробивки отверстий диаметром 0,8...10 мм динамическим способом, отраженный в работе [38], дал

следующие результаты: точность в пределах 7-10 квалитетов; параметр шероховатости поверхности разделения по периметру отверстия для заготовок из перекрестно-армированного углепластика типа КМУ $Rz40$ - $Rz20$, из однонаправленного бороалюминиевого композита $Rz20$ $Ra2{,}5$. Сравнительные усталостные испытания образцов с отверстиями, полученными сверлением и динамической пробивкой, выявили, что долговечность образцов со сверленными отверстиями составляет $0{,}4 \cdot 10^6$ циклов, пробитыми $1{,}5 \cdot 10^6$ циклов, т.е. в 3-4 раза выше.

Однако, при увеличении толщины КМ (более 1,5 мм) и объемной доли армирующих волокон при динамической пробивке отверстий возникает по периметру отверстия утяжка на входе инструмента и скол по толщине обрабатываемого материала. Наличие же в КМ высокомодульных и высокотвердых волокон вызывает при пробивке значительный износ пуансона и матриц, что сопровождается снижением качества отверстий.

Оптимизация технологических параметров процесса пробивки (скорость внедрения пуансона в заготовку, зазор между пуансоном и матрицей, сила прижима, значение и характер изменения силы подпора) затруднена для большого класса КМ при увеличении их толщины, изменения объемной доли волокон и схемы армирования, в результате чего не удается получить отверстия требуемого качества.

Попытка устранить недостатки динамической пробивки отверстий в инструментальном штампе путем совершенствования оснастки, например, использование беззазорной пробивки, приводит к дополнительным отрицательным факторам. Значительно возрастает стоимость оснастки, резко снижается стойкость инструмента и, самое главное, возрастают силы трения между пробивным пуансоном и заготовкой, что приводит к появлению внутренних дефектов в получаемых деталях с отверстиями.

Известные способы пробивки отверстий в однородных материалах, а также существующие методы повышения стойкости оснастки или полностью неприемлимы при пробивке отверстий в заготовках из КМ, или дают незначительный эффект.

Для динамического способа пробивки отверстий, как дающего наилучшие результаты из известных, необходимы дополнительные энергетические затраты, снижающие в первую очередь большие силы трения между инструментом и заготовкой и позволяющие создать оптимальное напряженно-деформированное состояние в зоне разделения. Такими источниками энергии не могут стать известные высокоэнергетические способы получения отверстий, например, электрогидроэффект или гидрорезание струей жидкости высокого давления. В этом случае огромная высвобождаемая энергия, во много

раз большая работы разделения, не имеет строгой направленности, не может вызвать требуемое для качественного разделения напряженно-деформированное состояние в зоне резания и приводит к побочным нежелательным явлениям.

Устранение недостатков динамической пробивки можно достигнуть только за счет совместного использования вязкой среды под высоким давлением и инструмента в процессе разделения.

Следует отметить, что роль вязкой среды (смазочного материала) при выполнении операций холодной штамповки сводится в основном к уменьшению внешних вредных условий и коэффициента трения, а также к адсорбционному размягчению прилегающего к поверхности трения деформированного слоя материала, что уменьшает силу обработки и повышает стойкость оснастки.

Однако, в практике процесса пробивки-вырубки однородных заготовок вязкая среда подается пассивно, что не может способствовать ее эффективности в роли смазочного материала, так как при значительных удельных давлениях, превышающих 50 МПа, жидкий смазочный материал выдавливается и при этом условия скольжения приближаются к трению без смазочного материала, что приводит к нецелесообразности применения жидких вязких сред.

Вязкая среда в процессе пробивки отверстий в заготовках из КМ должна использоваться не как пассивный смазочный материал, а как активная среда для воздействия на заготовку с целью обеспечения сдвига отделяемого материала относительно режущих кромок матрицы, создания оптимальной схемы равномерно-напряженного состояния с локализацией зоны деформирования и сведения к минимуму трения между заготовкой и инструментом.

С целью повышения качества пробиваемых отверстий и стойкости инструмента разработан способ гидродинамической пробивки отверстий [38], который может быть реализован как с использованием энергии упругой волны сжатия в пуансоне, так и с предварительным разгоном вязкой среды.

Теория упругости описывает состояние любого тела системой уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \dfrac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \dfrac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X = \rho \dfrac{\partial^2 U_x}{\partial t^2}; \\ \dfrac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \dfrac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \dfrac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y = \rho \dfrac{\partial^2 U_y}{\partial t^2}; \\ \dfrac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \dfrac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \dfrac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z = \rho \dfrac{\partial^2 U_z}{\partial t^2}, \end{cases} \qquad (4.1)$$

где σ, τ - с различными индексами проекции нормальных и касательных напряжений любой точки тела на оси координат; $U_{x,y,z}$ - проекции перемещения точек тела на оси координат; X, Y, Z- проекции на оси координат объемной силы, отнесенной к единице массы; ρ - плотность тела.

Рассматривая соосное соударение достаточно длинных и тонких стержней, можно решение системы уравнений (4.1) существенно упростить, пренебрегая действием всех типов волн, кроме одной продольной [1]. В этом случае скорости и напряжения точек в плоскости, перпендикулярной направлению ударной волны, оказываются одинаковыми.

Согласно теории плоского удара, приближенно можно считать, что для любой точки стержня справедливы следующие условия:

$$\sigma_y=\sigma_z=0;\quad \tau_{xy}=\tau_{yx}=\tau_{xz}=\tau_{zx}=0\,. \tag{4.2}$$

Таким образом, напряжения σ_x, направленные вдоль оси стержня, являются самыми главными и вызывают кроме продольных U_x и поперечные деформации U_y и U_z, которые могут быть найдены после подстановки условий (4.2) в уравнение связи деформаций и напряжений:

$$\frac{\partial U_x}{\partial x}=\frac{1}{E}\sigma_x;\quad \frac{\partial U_y}{\partial y}=-\frac{\mu}{E}\sigma_x;\quad \frac{\partial U_z}{\partial z}=-\frac{\mu}{E}\sigma_x. \tag{4.3}$$

Так как деформации $U_y=U_z=\Delta d$, т.е. равны увеличению диаметра стержня (рис.4.32), то

$$\Delta d=\frac{\mu}{E}d\sigma_x\,, \tag{4.4}$$

где μ коэффициент Пуассона; E модуль упругости стержня; d диаметр стержня.

Система уравнений (4.1) с учетом принятых допущений и пренебрежением влияния объемных сил $X=Y=Z=0$ будет иметь вид:

$$\frac{d^2U_x}{dt^2}=a^2\frac{d^2U_x}{dx^2}\,, \tag{4.5}$$

где $a=\sqrt{E/\rho}$.

Уравнение (4.5) называется уравнением продольной волны, а коэффициент a - скоростью звука в данном материале. Следовательно, напряжения деформации в стержне (рис.4.32) будут распространятся со скоростью звука a.

Для определения напряжений, возникающих в соударяющихся стержнях, необходимо найти импульс силы, который получили массы стержней, охваченные распространяющейся продольной волной через время dt (рис.4.33):

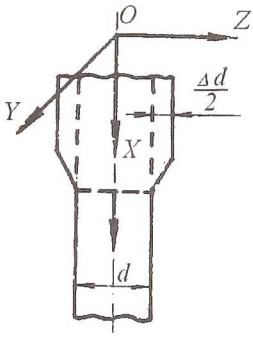


Рис.4.32. Увеличение диаметра стержня при ударе

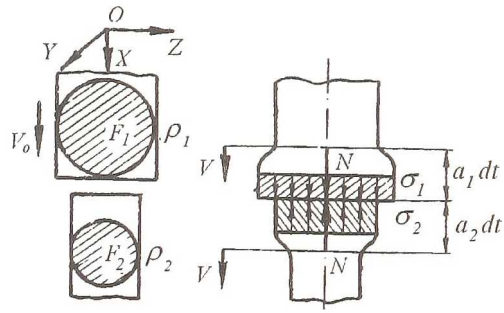


Рис.4.33. Схема плоского удара двух стержней

для первого стержня $Ndt=F_1\rho_1 a_1 dt(V_0-V)$, (4.6)

для второго стержня $Ndt=F_2\rho_2 a_2 dt V$, (4.7)

где N сила ударного взаимодействия между сторонами или сила удара; F_1 и F_2- площади поперечного сечения стержней; ρ_1 и ρ_2 плотности материала, из которых изготовлены стержни; a_1 и a_2 - скорости распространения продольной волны по стержням; V_0 - начальная скорость первого стержня, ударяющего по второму, находящемуся в состоянии покоя; V - мгновенная скорость контактной площадки.

Решая уравнение (4.7) относительно V, а также обозначив произведение акустической жесткости на площадь поперечного сечения через C, получим

$$N=\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}V_0 . \qquad (4.8)$$

Напряжение во втором стержне определяется из соотношения

$$\sigma_2=\frac{N}{F_2}; \quad \text{или} \quad \sigma_2=\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}\frac{V_0}{F_2} . \qquad (4.9)$$

Поставляя данное значение в уравнение (4.5), получим

$$\Delta d=\frac{\mu}{E}\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}\frac{V_0}{F_2} \qquad (4.10)$$

Удар бойка по пуансону при динамической пробивке отверстия диаметром 2...6 мм можно считать как соосное соударение стержней одинакового или близкого сечения, имеющих идеально плоские торцы, абсолютно перпендикулярные осям стержней. В этом случае в пуансоне при $\sigma_x<\sigma_s$ возникают упругие деформации, которые имеют волновой характер, при этом диаметр пуансона будет увеличиваться (рис.4.34).

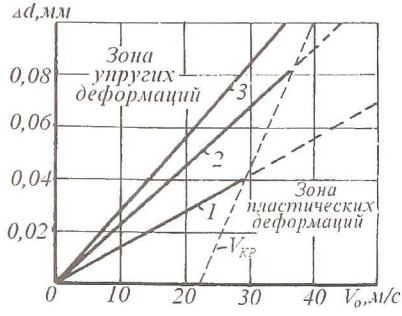


Рис.4.34. Зависимость увеличения диаметра пуансона от скорости соударения с ударником диаметром 8 мм диаметр пуансона:
1 - 2 мм; 2 - 4 мм; 3 - 6 мм

Если боек и пуансон имеют одинаковые площади сечения и выполнены из однородного материала, то после преобразования уравнение (4.10) будет иметь следующий вид:

$$\Delta d = \frac{\mu}{E}\frac{d\rho a V_0}{2}. \qquad (4.11)$$

Для упругой деформации пуансона необходимо, чтобы скорость соударения его с бойком была меньше критической:

$$V_0 < V_{KP} = \frac{2\sigma_s}{\rho a}, \qquad (4.12)$$

где σ_s - предел текучести материала пуансона и бойка.

Если между пуансоном и прижимом, который является направляющей, поместить вязкую среду, то перемещение фронта продольной волны сжатия вдоль пуансона к заготовке приведет к перекрытию зазора между пуансоном и направляющей, т.е. к запиранию вязкой среды в замкнутом объеме (рис.4.35, а).

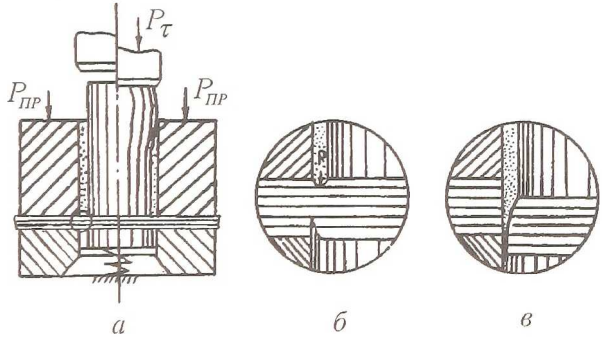


Рис.4.35. Основные этапы разделения заготовки из КМ при гидродинамичес-кой пробивке отверстий с генерированием упругой волны сжатия в пуансоне

Перекрытие возможно лишь при условии, когда зазор между пуансоном и направляющей (толщина вязкой среды) удовлетворяет (4.10) или (4.11), т.е. когда поперечная деформация пуансона равна двустороннему зазору между пуансоном и направляющей, причем отверстие в направляющей необходимо выполнить соосным и равным отверстию в матрице. Наличие скорости перемещения продольной волны сжатия более 5000 м/с и небольших односторонних зазоров 0,02...0,03 мм обуславливает значительное и резкое повышение давления вязкой среды в области между фронтом волны и заготовкой.

Импульсное давление вязкой среды на заготовку вызовет осадку отхода и концентрацию напряжений в заготовке со стороны матрицы (рис.4.35, б). Затем процесс разделения сопровождается совместным движением (внедрением) пуансона и слоя вязкой среды на его поверхности, что уменьшает трение между заготовкой и инструментом (рис.4.35, в).

Таким образом, в результате воздействия на вязкую среду волны сжатия пуансона происходит накапливание потенциальной энергии в жидкости за счет ее сжатия. Эта энергия реализуется в виде импульсного давления в зоне разделения, причем разделение начинается не только в зоне соприкосновения жидкости с заготовкой, но и со стороны матрицы, т.е. действие вязкой среды обуславливает беззазорный процесс пробивки.

Одним из недостатков рассмотренного выше способа пробивки отверстий в заготовках из КМ является пассивный метод управления давлением вязкой среды по периметру разделения, что не позволяет вносить поправки на свойства КМ, его толщину, сложности схемы армирования и т.д. Кроме того, после зарождения трещины в заготовке и внедрения пуансона давление вязкой среды в процессе разделения падает, а это увеличивает давление заготовки на боковую поверхность пуансона, что влияет на его износ.

С целью устранения этих недостатков можно использовать гидродинамическую пробивку отверстий с разгоном вязкой среды. Сущность этого метода основана на том, что максимальное давление, возникающее при ударе капли жидкости о твердую поверхность, способно разрушить прочные материалы - сталь, титан. История вопроса и результаты изучения механизмов разрушения материалов при капельно-ударном воздействии излагаются в работах [56, 64]. В них определены пороговые скорости повреждения и разрушения образцов в зависимости от диаметра воздействующих капель и струек.

Так в работе [56] приводятся данные пороговой скорости повреждения при малых каплях диаметром около 10 мкм: для сталей она достигает $(1\text{-}1{,}5)\cdot 10^3$ м/с; для алюминия - $(0{,}3\text{-}0{,}5)\cdot 10^3$ м/с.

Используя капельно-ударное воздействие жидкости путем разгона ее в кольцевом канале между прижимом и пуансоном до больших скоростей, можно получить как эффект разрушения материала заготовки в локализованной зоне контакта с образованием в ней впадины и трещины, так и волны напряжений, которые, распространяясь на глубину заготовки, вызовут концентратор напряжений на острых кромках матрицы с возникновением разрушающей трещины или осадки отхода заготовки.

Разгон вязкой среды до значительных скоростей возможен путем применения мультипликатора, с заполнением его вязкой средой

не полностью, а оставляя свободным канал истечения, который должен быть спрофилирован соответствующим образом.

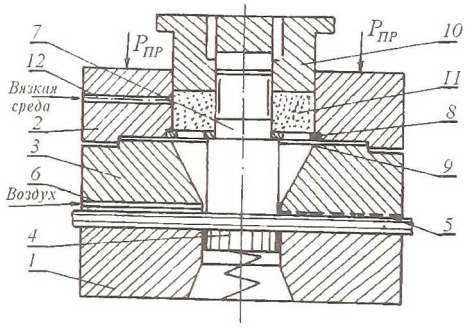


Рис.4.36. Устройство для гидродинамической пробивки отверстий с разгоном для вязкой среды

Схема решения реализации этого процесса показана на рис.4.36 [38]. Заготовка устанавливается на матрицу *1* и фиксируется прижимом, который состоит из верхней *2* и нижней *3* частей, имеющих ступенчатую полость, соосную с отверстием в матрице. Переход от большего диаметра полости к меньшему имеет форму конуса и расположен в нижней части прижима *3*. Под заготовкой в отверстии матрицы размещен подпор *4*. На основании нижней части прижима для удаления воздуха выполнен ряд капиллярных каналов *5* и канал *6* для подачи сжатого воздуха. Пробивной пуансон *7* проходит через направляющую перегородку *8*, в которой выполнен ряд овальных отверстий. Верхняя полость прижима, заполненная вязкой средой *11*, отделена от нижней полости трехслойной прокладкой *9* из упругого материала. Прокладка многослойная, каждый слой имеет шесть лепестков. В ненагруженном состоянии линии разъемов лепестков одного слоя перекрывают линии разъемов второго.

При ударном воздействии силы $P_т$ на поршень *10* вязкая среда через овальные окна в перегородке *8*, отогнув лепестки многослойной прокладки *9*, попадает в коническую полость, где разгоняется и с большой скоростью поступает в кольцевой зазор между пуансоном и стенками прижима. По условию неразрывности скорость движения вязкой среды в кольцевом зазоре будет во столько раз больше скорости перемещения поршня, во сколько раз площадь его торца больше площади поперечного сечения кольцевого зазора. При ударе вязкой среды о заготовку одновременно происходит касание поршнем верхнего торца пуансона и начинается их совместное движение. При этом поршень *10* продолжает проталкивать вязкую среду в кольцевой канал, а затем в зазор между заготовкой и боковой поверхностью пуансона. После окончания процесса разделения и возвращения поршня *10* и пуансона *7* в исходное положение в канал *6* подается сжатый воздух для удаления остатков вязкой среды и возвращения многослойной прокладки *9* в исходное положение. Потом через канал *12* в плоскость *11* подается строго дозированное количество вязкой среды и устройство готово для повторного цикла работы.

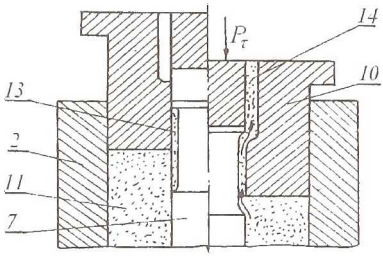


Рис.4.37. Схема вывода излишков вязкой среды при гидродинамической пробивке отверстий

Как показали эксперименты, при наличии избыточного количества вязкой среды и полости *11*, в процессе разделения наблюдается утечка вязкой среды между заготовкой и прижимом, что способствует появлению радиальных углублений на КМ. С целью устранения указанного недостатка предусмотрен вывод излишков вязкой среды из зоны разделения, для чего на верхней части пуансона выполнялся кольцевой канал *13* (рис.4.37). В момент начала совместного движения поршня *1* и пуансона *7* полость *11* через кольцевую проточку *13* на пуансоне сообщается с отверстием *14* в поршне и избыток вязкой среды выдавливается наружу. Размеры кольцевого канала *13* на пуансоне (глубина и осевая протяженность) позволяют регулировать силу воздействия вязкой среды на заготовку в процессе разделения. С помощью описанной системы регулирования давления вязкой среды удалось полностью исключить дефекты на пробиваемом материале и необходимость очень точной дозировки количества вязкой среды, подаваемой в полость *11*. Последнее значительно расширяет возможность использования оснастки для пробивки отверстий в заготовках из КМ с различными физико-механическими свойствами и толщинами.

Можно предположить, что при встрече летящей струи вязкой среды с заготовкой на поверхности последней возникает импульсное давление, вызывающее ударную волну сжатия или продольную волну, которая, распространяясь по толщине заготовки, при встрече с режущими кромками матрицы создает концентратор напряжений (рис.4.38, а)

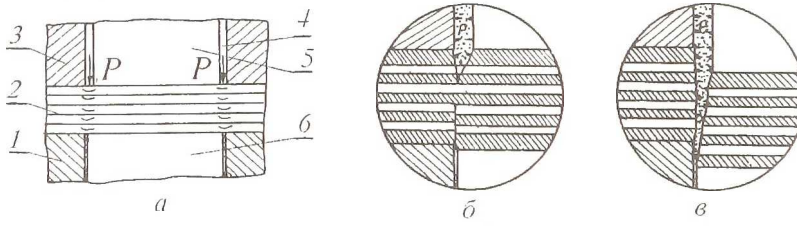


Рис.4.38. Стадии процесса разделения заготовки из КМ:
1 - матрица; 2 - заготовка; 3 - прижим; 4 - вязкая среда; 5 - пуансон; 6 - подпор

Под действием нагрузки, рассредоточенной по площади кольца, на поверхности заготовки произойдет осадка отхода разделяемого КМ, что обусловит сдвиг отделяемого материала относительно режущих кромок матрицы с разрушением армирующих воло-

кон (рис.4.38, б). Момент сдвига отделяемого материала относительно матрицы соответсвует началу совместного движения поршня и пуансона (рис.4.38, в). В процессе движения пуансона вязкая среда под действием поршня подается под высоким давлением в зону разделения, что предопределяет распространение разрушающей трещины со скоростью, большей скорости перермещения пуансона. Таким образом, между заготовкой и пуансоном в процессе разделения образуется гарантированный зазор, что создает принудительный жидкостной или гидродинамический режим трения.

Для оценки максимального давления на границе контакта вязкой среды и заготовки можно использовать выражение, основанное на теории гидравлического удара, разработанной Н.Е.Жуковским:

$$P=\alpha\rho a V, \qquad (4.13)$$

где α - поправочный коэффициент, который зависит от свойств КМ; ρ - плотность вязкой среды; a скорость звука в вязкой среде; V - скорость соударения вязкой среды с заготовкой.

Давление, действующее на площадь соприкосновения жидкости и твердого тела, создает силу, перпендикулярную твердой поверхности, при этом напряжения, возникающие в материале, может привести к возникновению трещин и разрушению. Точный режим, при котором материал разрушается, т.е. связь напряжений и повреждения, до настоящего времени еще полностью не изучен. Вычисления, которые явились бы полным решением проблемы зависимости течения и напряжений, очень сложны и до сих пор никем не проведены. Поэтому были приняты упрощенные методы представления явлений на границе жидкости и твердой поверхности, т.е. сделаны следующие допущения [64]: воздействие боковых вытекающих струй незначительно; давление по всей площади соприкосновения жидкости с поверхностью постоянно; задача является одномерной.

Явление взаимодействия представлялось как соударение двух цилиндров одинаковых диаметров с плоским и гладким поверхностями на концах. Считалось, что цилиндры ограничены с боков (это обеспечивает постоянную площадь контакта), и что внутри цилиндров проходят только плоские одномерные волны. Поэтому при ударе вязкой среды по заготовке из КМ, армированного волокнами, коэффициент α рекомендуется принимать равным

$$\alpha = \frac{1}{1+\left(\rho_a / \rho_{KM}\, a_{KM}\right)}, \qquad (4.14)$$

причем плотность ρ_{KM} и скорость звука a_{KM} для КМ можно определять по следующим формулам:

$$\rho_{KM}=\rho_f V_f+\rho_m V_m, \qquad (4.15)$$

$$a_{KM} = \sqrt{E_{22}/\rho_{KM}}\,. \qquad (4.16)$$

Построчные индексы f и m относятся соответственно к волокну и основе; V_f - является относительным объемом волокон, а V_m - относительным объемом основы; E_{22} - эквивалентный модуль Юнга в направлении, перпендикулярном к волокнам.

Таким образом, подставляя в выражение (4.13) скорость истечения вязкой среды из кольцевого канала устройства для гидродинамической пробивки, определяемой по формуле, приведенной ниже, можно найти нормальную силу, которая будет действовать на поверхность разделяемой заготовки из КМ в момент гидродинамического удара. Она вычисляется по следующему уравнению:

$$P_\tau = \rho\pi\left(R_k^2 - R_n^2\right). \qquad (4.17)$$

Сложность гидродинамических процессов, протекающих за малый промежуток времени (порядка 100-500 мкс) и имеющих ударный волновой характер, представляет трудность для теоретических расчетов в общем виде. Поэтому была получена приближенная зависимость, которая позволяет определить параметры проектируемого устройства для гидродинамической пробивки отверстий и рассчитать необходимую мощность энергетического оборудования без учета сил сопротивления движению вязкой среды

$$V_{BC} = \sqrt{\frac{\dfrac{\rho m_б^2 V_0^2}{m_c m_{BC}} - P_a}{\rho\left[\dfrac{m_c}{m_{BC}}\dfrac{F_ц^2}{F_k^2} + \dfrac{1}{2}\left(1 - \dfrac{F_ц^2}{F_k^2}\right)\right]}}, \qquad (4.18)$$

где V_{BC} скорость движения вязкой среды в кольцевом канале; ρ плотность вязкой среды; m_c - суммарная масса бойка, поршня и вязкой среды; $m_б$ - масса бойка; m_{BC} - масса вязкой среды; F_k и $F_ц$ площади каналов кольцевого и цилиндрического; P_a атмосферное давление; V_0 - скорость соударения бойка и поршня.

Таким образом, разработанный способ гидродинамической пробивки отверстий в заготовках из КМ позволяет: использовать кинетическую энергию вязкой среды для непосредственной обработки поверхности разделения; изменить напряженно-деформированное состояние материала заготовки, приблизив его к схеме всестороннего равномерного сжатия; локализовать зону деформирования или зону разрушения волокна; получить разрушающую трещину от режущих кромок матрицы; уменьшить контактные нагрузки на режущие кромки пуансона и матрицы со стороны торца за счет предопределяюще-го разрушающего действия на заготовку вязкой среды; свести к минимуму трение между заготовкой и инструментом, увеличив стойкость оснастки и повысив качество пробиваемых отверстий.

Процесс гидродинамической пробивки рекомендуется использовать при получении отверстий в заготовках из КМ различных типов: боро-, угле- и органопластика, алюминий-сталь, бороалюминий при толщине от 0,5 до 5 мм.

Процесс гидродинамической пробивки отверстий в заготовках на основе бороалюминиевой композиции в производственных условиях характеризовался точностью пробивки отверстий 7-9 квалитетов (при стойкости инструмента 150-200 отверстий), строгой цилиндричностью (практически без утяжки и скола), полным отсутствием заусенцев (при этом параметр шероховатости поверхности разделения в пределах $Ra2{,}5$-$Rz20$).

Для динамической и гидродинамической пробивки отверстий применяется магнитно-импульсное оборудование, обладающее высокой производительностью (машинное время $10^{-3}...10^{-5}$с), возможностью точной регулировки давления на инструмент. При этом прижим заготовки в зоне отверстия может осуществляться торцем инструментальной головки, приводимой в движение с помощью пневмо- или гидропривода.

Принципиальная электрическая схема установки показана на рис.4.39.

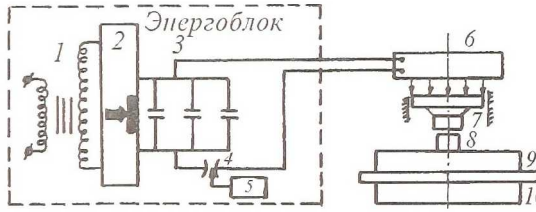


Рис.4.39. Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки

При включении установки в сеть конденсаторная батарея *3* с помощью зарядно-выпрямительного устройства, включающего в себя повышающий трансформатор *1*, выпрямитель *2* и зарядное сопротивление, заряжается до заданного регулятором *5* запасаемой энергии напряжения.

При достижении на конденсаторной батарее *3* соответствующего напряжения на поджигающий электрод трехэлектродного разрядника *4* от специальной схемы подается высоковольтный поджигающий импульс, инициирующий электрический пробой рабочего промежутка разрядника и коммутирующий разрядную цепь. Импульс тока, проходящий через индуктор *6*, создает импульсное магнитное поле, которое разгоняет боек *7*. Кинетическая энергия бойка передается пуансону *8*, который через направляющую *9* воздействует на заготовку. В результате происходит процесс пробивки отверстия в заготовке, а отход проталкивается через матрицу *10*.

Заданная скорость бойка в момент соударения его с пуансоном обеспечивается уровнем энергии заряда энергоблока.

Несмотря на простоту принципа действия, магнитно-импульсное оборудование представляет собой сложную электромеханическую систему, от выбора параметров которой существенно зависят масса и габаритные размеры инструмента, и обеспечивается необходимая скорость бойка при ударе.

4.5. Клепка деталей из композиционных материалов

Для создания эффективных конструкций недостаточно иметь КМ с высокими прочностными характеристиками, необходимо реализовать эти характеристики в готовых конструкциях и обеспечить надежный метод соединения отдельных элементов, например, клепкой.

Основной особенностью процесса образования клепаных соединений деталей из КМ следует считать возможность разрушения композиции в процессе клепки, поэтому традиционный подход для образования заклепочных соединений неприемлем.

В настоящее время процессы клепки конструкций из КМ осуществляются путем применения одного из трех главных приемов.

1. Локализация деформируемого объема заклепки.
2. Разупрочнение материала заклепки нагревом.
3. Подкрепление отверстий и применение специального крепежа.

Применение специальных приемов клепки вызвано необходимостью ограничить радиальную деформацию отверстия при осаживании стержня заклепки. Таким образом клепка КМ требует решений, противоположных тем, которые найдены для клепки однородных материалов. Вместо высоких натягов стержня заклепки в отверстии, характерных для соединений однородных материалов, КМ требуют нормированных натягов до 0,5-1,5%, в зависимости от природы и свойств материалов. При высоких натягах начинается разрушение матрицы КМ и падает работоспособность соединения. В то же время для обеспечения необходимой жесткости соединения и равномерной загрузки всех силовых точек некоторый натяг необходим. Столь противоречивые требования обуславливают многообразие решений и продолжающийся поиск новых.

Все они призваны обеспечить плотную посадку стержня заклепки в отверстие и формирование замыкающей головки заклепки при минимальной раздаче прилегающей к ней части стержня заклепки. Достигается это различными способами как конструкторскими, так и технологическими.

К первым можно отнести применение шайб под замыкающей головкой заклепки, препятствующих раздаче стержня заклепки под головкой, или применение заклепок с полостью в месте образования

замыкающей головки, что позволяет существенно снизить силу расклепывания и, соответственно, радиальную деформацию стержня заклепки.

Этого же эффекта можно добиться применяя локальное нагружение стержня по части сечения, как это происходит при клепке давлением с раскаткой, или изменяя режим нагружения, как при переходе с прессовой клепки на импульсную, например, магнитно-импульсную.

Очевидно, что в этих случаях, как и во многих других, применяются уже технологические способы решения задачи.

К этим же способам относятся процессы клепки КМ с нагревом заклепки, позволяющим снизить силу расклепывания, а, следовательно, и радиальную деформацию отверстия в пакете.

Наиболее перспективным и опробованным методом образования клепаных соединений пакетов из КМ и смешанных является гидродинамическая клепка (рис.4.40), в которой используются полупустотелые заклепки, плотно или с небольшим натягом устанавливаемые в пакет, и металлические шайбы, также с натягом устанавливаемые на стержень заклепки. В полость заклепки набивается вязкая среда (рис.4.40, а). В результате с помощью обжимки специальной формы легко осуществляется раздача верхнего конца стержня с полостью. При этом наличие конической поверхности обжимки на 1-ом переходе не позволяет деформироваться торцу заклепки, а за счет замкнутости объема полости заклепки, заполненной вязкой средой, при перемещении обжимки повышается давление в жидкости, что вызывает деформацию стенок заклепки. Так как диаметр отверстия в заклепке небольшой, то сила от действия вязкой среды на стержень заклепки тоже небольшая и не вызывает раздачу заклепки по длине ее тела, размещенного внутри пакета.

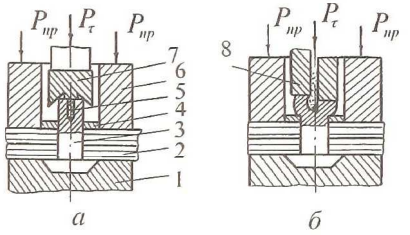


Рис.4.40. Двухпереходная гидродинамичес-кая клепка из КМ и смешанных пакетов:
а - 1-ый переход: 1 - поддержка; 2 - пакет; 3 - стержень полупустотелой заклепки; 4 - кольцо-шайба; 5 - жидкость в полости заклепки; 6 прижим; 7 обжимка; б 2-ой переход: 8 обжимка второго перехода

При 2-м переходе обжимкой с плоским торцом окончательно формируется замыкающая головка заклепки (рис.4.40, б). Гидродинамический процесс клепки позволяет производить соединение пакетов из различных КМ толщиной до 10 мм, при диаметре 3...6 мм заклепками из материала Д18, В65. Причем клепку пакетов можно осуществлять в два перехода на магнитно-импульсных установках (МИУ) с запасаемой энергией до 5...10 кДж.

В ЦАГИ проводились испытания несущей способности клепаных комбинированных панелей при сжатии. Конструкция панелей представляла собой обшивку из Д16АТ, подкрепленную стрингерами из прессованных профилей ПК682-12-1 закрытого поперечного сечения из материала Д16ТПП. Панели по полкам стрингеров усиливались накладками из продольно армированного бороалюминия. Накладки крепились с помощью полупустотелых заклепок из материала В65. Пробивка отверстий под заклепки и клепка производились гидродинамическим методом с использованием МИУ.

Результаты испытаний: подкрепление дюралевых панелей бороалюминиевыми накладками, составляющими 13,4% общей площади, повышает модуль упругости на 26,8% по сравнению с дюралевыми; несущие способности подкрепленных бороалюминиевых комбинированных панелей на 35% выше, чем дюралевых той же площади поперечного сечения; панели по массе примерно одинаковы, т. к. плот-ность бороалюминия 2500 кг/м^3 немного меньше плотности дюраля.

Клепка с прошивкой стержня заклепки позволяет отказаться от предварительно доработанной полупустотелой заклепки и использовать нормализованную стержневую заклепку. Это исключает трудоемкую операцию сверления заклепки с применением специальной оснастки. Схема процесса клепки с прошивкой стержня заклепки показана на рис.4.41.

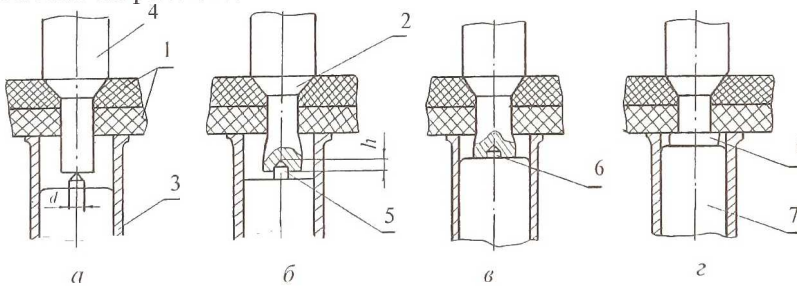


Рис.4.41. Схема клепки с прошивкой:
а, б, в, г - стадии клепки

В отверстие пакета *1* помещают заклепку *2* по посадке соответствующей 9-му квалитету. Сжимают пакет прижимом *3* и плунжером *4*. В корпус прижима подводят прошивной инструмент *5* (рис.4.41, а) и в выступающей из отверстия части стержня заклепки прошивают глухое отверстие *6* (рис.4.41, б, в). Отводя прошивной инструмент *5*, в рабочую зону вводят расклепывающий пуансон *7* и осуществляют формирование замыкающей головки *8* (рис.4.41, г).

Испытания показали, что для осуществления клепки пакетов из КМ толщиной 2-5 мм алюминиевыми заклепками диаметром 4 мм

может быть использован прошивной инструмент диаметром d=2-3 мм, при глубине прошивки, равной h=(0,5-0,7) d. Эти параметры процесса обеспечивают незначительные силы расклепывания и радиальные натяги, что предохраняет от разрушения кромку отверстия пакета из КМ и повышает качество заклепочного соединения.

Применение технологической разъемной шайбы, выполняющей роль буфера для проникновения возникающих деформаций внутрь пакета и снижающей натяг, позволяет снизить массу соединения и материалоемкость, вследствие того, что шайба съемна, и ее можно многократно использовать при клепке. Схема процесса клепки с технологической шайбой показана на рис.4.42.

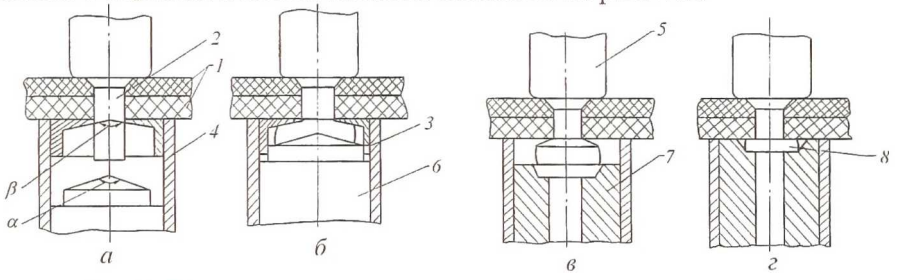


Рис.4.42. Схема клепки с технологической шайбой: а, б, в, г - стадии клепки

После установки заклепки *2* в отверстие пакета *1* склепываемых деталей из КМ на стержень заклепки, выступающей из пакета, устанавливают технологическую разъемную шайбу *3* (рис.4.42, а). Затем производят сжатие пакета прижимом *4* и плунжером *5*. Далее предварительно осаживают стержень заклепки конусным пуансоном *6* (рис.4.42, б). После чего технологическую шайбу удаляют из рабочей зоны и осуществляют окончательную осадку замыкающей головки *8* заклепки специально обжимкой *7* (рис.4.42, в, г). Пуансон рекомендуется выполнять с углом конусности $\alpha=150°$, разъемную шайбу с углом конусности внутренней поверхности основания $\beta=170°$ (данные углы конусности обеспечивают наименьшую силу осаживания и установлены экспериментально).

Установка стержня заклепки с зазором в отверстие пакета, а не по тугой посадке, позволяет применять этот метод при стапельной сборке. При этом натяги не превышают 1,5%, а уменьшение массы конструкции за счет исключения подкладных шайб под замыкающие головки заклепок со стороны КМ довольно значительно.

Для тонколистовых пакетов из КМ можно применять методы клепки, позволяющие пробивать отверстие торцом стержня заклепки с одновременной ее установкой в это отверстие с натягом, т.е. с минимальным коэффициентом заполнения.

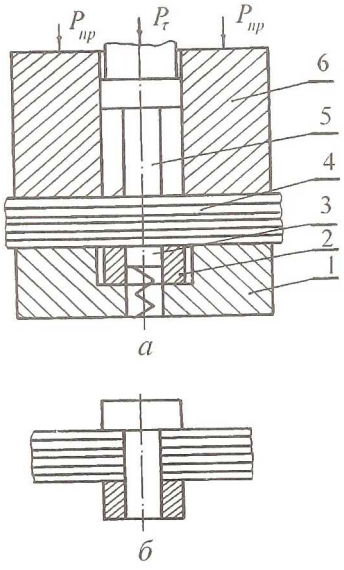


Рис.4.43. Клепка пакетов из КМ с помощью матрицы-кольца:
а схема начальной стадии процесса клепки; б поставленная заклепка; 1 опора; 2 кольцо-матрица; 3 подпор; 4 пакет из КМ; 5 - заклепка; 6 - прижим

На рис.4.43а, показан склепываемый пакет из КМ, который устанавливается на опору 1 и прижимается прижимом *6*. В отверстие прижима *6* устанавливается по оси клепки заклепка *5* и соосно с ней со стороны замыкающей головки, т.е. с другой стороны пакета из КМ, кольцо-матрица *2*, подпружиненная подпором *3*.

Кольцо-матрицу и заклепку при этом необходимо изготавливать из стали, разница между их диаметра-ми для обеспечения гарантированного натяга должна составлять 1-2%. Прочность замыкающей головки определяется силами трения между матрицей-кольцом и стержнем заклепки, что не всегда достаточно, поэтому для повышения характеристик на отрыв соединения применяют дополнительное расклепывание на кольце-матрице выступающей части стержня (рис.4.43, б).

Пробивку отверстия в пакете из КМ можно осуществить и стержнем заклепки из алюминиевого сплава с последующим образованием замыкающих головок, но при этом необходимо использовать вязкую среду.

На рис.4.44.а показан пакет из КМ 3, который зафиксирован направляющей плитой *6* на матрице *1*. Матрица и направляющая плита имеют равные диаметры отверстий. Под плитой в отверстии матрицы находится пуансон *2* подпора на упругом элементе. Стержень заклепки *4* устанавливается с зазором в направляющую плиту *6*, в которой помещается вязкая среда *5*, например, жидкотекучий клей.

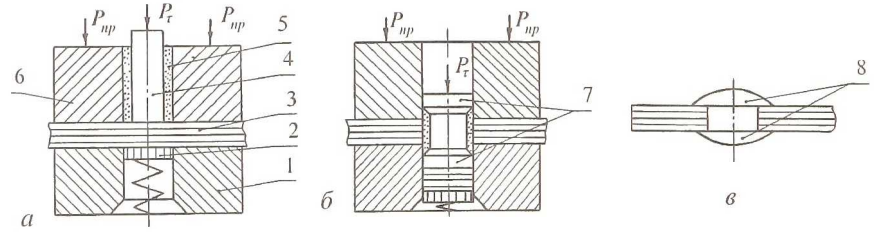


Рис.4.44. Стадии получения клепаного соединения пакета из тонколистовых КМ:
а схема начальной стадии процесса клепки; б пластическое деформирование концов стержня; в - формообразование замыкающих головок

В начальной стадии получения клепаного соединения происходит предварительное пластическое деформирование концов стержня с образованием утолщений *7* на его концах в виде поясков (рис.4.44, б) за счет действия импульсной силы $P_т$. Пластическое увеличение диаметров торцов стержня происходит до диаметра отверстия в направляющей плите *6*. Причем наличие вязкой среды способствует оформлению утолщения и устойчивости стержня при деформации. Затем происходит процесс беззазорной пробивки пакета из КМ. Вследствие разгрузки материала пакета происходит фиксация стержня, а затем любым известным методом, например осадкой или развальцовкой, окончательно формообразуют замыкающие головки *8* (рис.4.44, в). При этом получается качественное отверстие в соединяемых листах пакета и устраняется наличие какого-либо зазора между стержнем заклепки и поверхностью отверстия.

Одним из методов решения проблемы повышения качества заклепочных соединений при клепке пакетов, содержащих КМ является клепка с электронагревом заклепок на точечных электросварочных машинах.

При клепке с электронагревом через заклепку с помощью электродов-пуансонов пропускают электрический ток, в результате чего заклепка нагревается и в нагретом состоянии осаживается. При нагреве температура материала в зоне образования замыкающей головки заклепки должна соответствовать температуре горячего деформирования, а время нагрева должно быть мало, чтобы свести до минимума температурное воздействие заклепки на КМ.

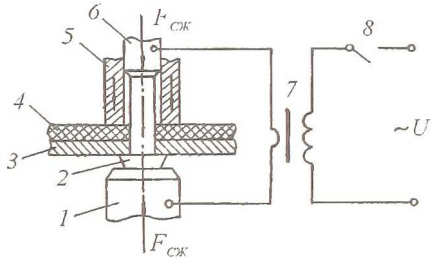


Рис.4.45. Процесс осаживания заклепки

Схема процесса осаживания заклепки представлена на рис.4.45.

Процесс термоимпульсной клепки осуществляется следующим образом. Заклепку *2* помещают в подготовленное отверстие пакета соединяемых деталей *3*, *4* и устанавливают на опорный электрод-поддерж-ку *1*. Подвижная прижимная втулка *5* осуществляет сжатие пакета, устраняя зазор между деталями *3* и *4*, а затем расклепывающий электрод *6* создает силу $F_{СЖ}$ на выступающий конец заклепки. При достижении $F_{СЖ}$ определенного заданного значения контактор *8* (синхронный прерыватель сварочного типа) подключает силовой трансформатор *7* к питающей сети. Через электроды *1*, *6* и заклепку *2* при этом протекает импульс электрического тока заданной силы. По истечении времени импульса заклепка разогревается до пластического состояния и осаживается под действием $F_{СЖ}$.

Температура при электронагреве в зоне заклепки зависит от силы тока I, продолжительности импульса τ, материала, диаметра и длины заклепки, конструкции склепываемого пакета и силs сжатия электродов $F_{СЖ}$.

Снижение силы при осаживании заклепки является одним из основных преимуществ способа клепки с электронагревом заклепок. Так, например, при клепке заклепки ∅4,0 мм из материала 12Х18Н9Т при $t_З$=1200°С сила осаживания Р=10 кН, в случае же холодного осаживания такой же заклепки Р=58 кН. Для заклепок ∅4,0 мм из материала В65 при $t_З$=400°С сила осаживания Р = 6 кН, а при холодном осаживании Р=21 кН.

Клепка с электронагревом стержня заклепки на точечных сварочных машинах малой мощности, оснащенных магнитно-импульсной головкой (МИГ), расширяет диапазон применяемых сварочных машин за счет уменьшения первоначального давления электродов, создает возможность применения электросварочных клещей для сборки элементов конструкций в стапелях.

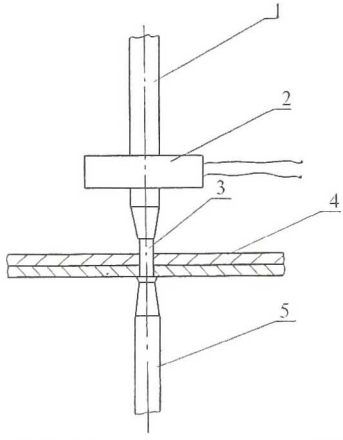


Рис.4.46. Схема процесса клепки КМ с электронагревом стержня заклепки на точечной сварочной машине, оснащенной МИГ

Сущность метода клепки заключается в следующем (рис.4.46).

При клепке с электронагревом через заклепку с помощью электродов верхнего *1* и нижнего *5* пропускают электрический ток, в результате чего заклепка *3* нагревается и в нагретом состоянии осаживается в элементы конструкции *4* с помощью МИГ *2*, смонтированной на верхнем электроде.

МИГ является инструментом-преобразователем электрической энергии в механическую перемещения бойка за краткое время импульс. Она позволяет за счет большой запасаемой энергии осуществлять деформацию заклепок с меньшей силой деформирования по сравнению со статическим методом приложения силы деформирования (гидравлическим, пневматическим).

МИГ (рис.4.47) представляет из себя корпус *2*, внутри которого размещается индуктор *3*, к которому подведен кабель *7* от МИУ и боек *4*. Боек под действием электро-магнитных сил воздействует на электрод *1* с закрепленной на нем обжимкой *6* и производит оформление замыкающей головки.

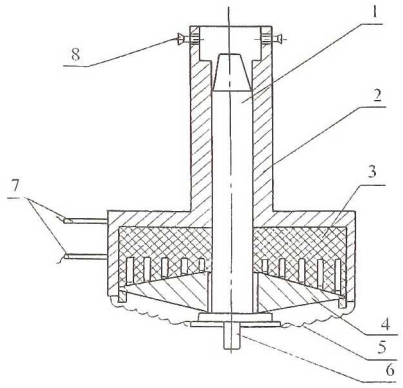


Рис.4.47. Магнитно-импульсная головка:

1 - электрод верхний; 2 - корпус; 3 - индуктор; 4 - боек; 5 - поддерживающее устройство; 6 - обжимка; 7 - кабель; 8 - винты установочные

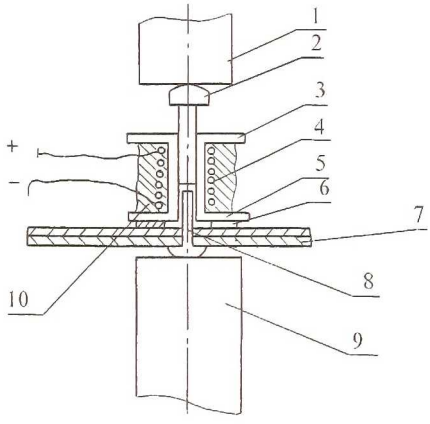


Рис.4.48. Схема нагревательного устройства:

1 - боек; 2 - пуансон; 3 - контейнер нагревательный; 4 - спираль нагревательная; 5 изоляционное покрытие; 6 шайба регулировочная; 7 - склепываемый пакет; 8 - заклепка; 9 - поддержка; 10 - изолятор асбестовый

Сущность термоимпульсной клепки КМ с нагревом выступающей части стержня заклепки с теплопередачей заключается в том, чтобы производить нагрев не всей заклепки, а только области замыкающей головки.

При этом повышение пластичности выступающей части стержня приводит к уменьшению силы осаживания (деформирования) замыкающей головки заклепочного соединения и уменьшению давления стержня на стенки пакета. Схема нагревательного устройства показана на рис.4.48.

В центре контейнера *3* имеется отверстие для размещения в нем выступающей над пакетом из КМ *7* части заклепки *8* (например, для заклепки диаметром 4,0 мм диаметр отверстия в контейнере равен 4,1 мм). На внешнюю поверхность контейнера, покрытую электроизоляционным слоем из окиси алюминия намотана нагревательная спираль *4*, концы которой присоединены к источнику питания. Для сохранения теплового режима спираль закрывается в несколько слоев асбестовым шнуром.

Порядок клепки с применением нагревательного устройства: контейнер *3* устанавливается на выступающий стержень заклепки *8* и подкладную (технологическую) шайбу *6*, внутренний диаметр и толщина которой определяет диаметр и высоту замыкающей головки заклепки. Деформация заклепки осуществляется пуансоном-обжимкой *2* путем выдавливания нагретой части стержня в пространство, образованное с помощью шайбы. Динамическая сила пуансону-обжимке сообщается бойком *1* от МИГ или молотка.

Преимущества этого метода клепки: возможность применения простого оборудования; применение в условиях стапельной сборки; незначительное температурное воздействие материала заклепки на КМ; повышение качества клепки за счет оптимального натяга заклепочного соединения вследствие уменьшения и регламентации силы осаживания.

Одним из методов повышения несущей способности механического точечного соединения деталей из КМ является подкрепление стенок отверстия элементами в виде втулок и колец из однородных материалов, устанавливаемых между болтом (заклепкой) и стенкой отверстия. Подкрепление предполагает совместную работу подкрепляющего элемента и листовой заготовки вокруг отверстия. При этом на границе их контакта должно выполняться условие сопряжения

$$\sigma_r = \sigma_r^{(1)},\ \tau_{r\theta} = \tau_{r\theta}^{(1)},\ \sigma_\theta = \sigma_\theta^{(1)},$$

где σ_r, $\sigma_r^{(1)}$ - радиальные напряжения соответственно на границе отверстия в листовой заготовке и на внешнем контуре втулки; $\tau_{r\theta}$, $\tau_{r\theta}^{(1)}$ – касательные напряжения; σ_θ, $\sigma_\theta^{(1)}$ тангенциальные напряжения.

Постановка подкрепляющей втулки в отверстие детали из КМ позволяет существенно перераспределить напряжения и снизить коэффициент концентрации напряжений по периметру отверстия. Одним из методов постановки подкрепляющей втулки является раздача ее по внешнему диаметру путем осадки с одновременным образованием поля упругих сжимающих напряжений по периметру отверстия в КМ.

Для реализации этого метода [8] необходимо, чтобы исходная длина h_0 втулки *1* (рис.4.49, а) превышала толщину листовой заготовки *3* на Δh, выбираемую в зависимости от физико-механических свойств КМ. Листовую заготовку с подкрепляющей втулкой располагают на матрице *2* и фиксируют прижимом *4*. В соосные отверстия втулки и прижима устанавливают ступенчатый пуансон *5*, который под действием силы *P* сжимает втулку по высоте (рис.4.49, б), что вызывает радиальную раздачу отверстия в листовой заклепке и образование поля напряжений по периметру отверстия (рис.4.49 в). При этом внутренний диаметр втулки *1* остается постоянным.

В процессе деформирования втулки по ее торцам, внутренней и внешней поверхностям действуют касательные силы трения, а также нормальные силы со стороны пуансона и анизотропной заготовки (см. рис.4.49). Деформациями прижима и матрицы можно пренебречь, так как их жесткость значительно выше жесткости втулки.

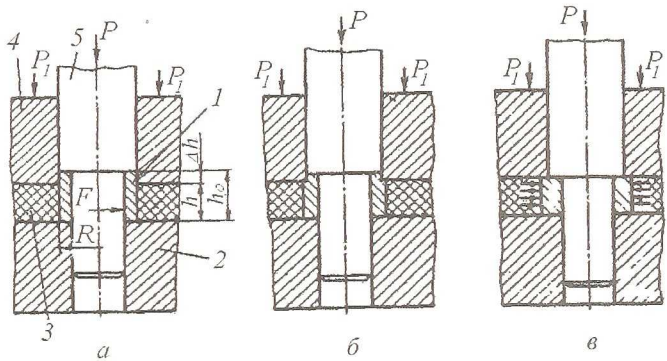


Рис.4.49. Схема процесса постановки втулки в отверстие

Работу внешних сил P, нормальных к торцу втулки, можно записать в виде

$$A_\sigma = \iint_F \sigma_z \Delta h dF = \Delta h P \ , \qquad (4.19)$$

где σ_z - осевые напряжения; F - площадь поперечного сечения втулки.

Из условия равенства работ внешних сил A_σ и деформирования втулки $A_Д$ получим

$P=A_Д/\Delta h$.

Работу деформирования втулки найдем из уравнения

$$A_Д=A_{BH}+A_{TP1}+A_{TP2}+A_{COПР} \ , \qquad (4.20)$$

где A_{BH}, A_{TP1}, A_{TP2}, $A_{COПР}$ - соответственно работы внутренних сил по изменению объема и формы тела, сил трения по торцам и внутренней поверхности втулки, сил сопротивления листовой заготовки.

Работу внутренних сил по изменению объема и формы втулки с учетом нелинейного упрочнения осаживаемого материала можно представить в виде

$$A_{BH} = \frac{\sigma_B}{\sqrt{3}(1-\varepsilon_l)\left(\sqrt{3}\varepsilon_l\right)^n (1+n)} \iiint_V \Gamma^{1+n} dV \ , \qquad (4.21)$$

где σ_B - временное сопротивление разрыву осаживаемого материала; ε_l относительное сужение, отвечающее образованию устойчивой шейки материала втулки; $n=\varepsilon_l/(1-\varepsilon_l)$; Γ интенсивность деформации сдвига;

$$\Gamma = 2\sqrt{\varepsilon_\rho^2 + \varepsilon_\rho \varepsilon_\theta + \varepsilon_\theta^2 + \frac{1}{4}\left(\gamma_{\rho z}^2 + \gamma_{\theta z}^2 + \gamma_{\rho\theta}^2\right)} \ , \qquad (4.22)$$

где ε_ρ, ε_θ, $\gamma_{\rho\theta}$, $\gamma_{\rho z}$, $\gamma_{\theta z}$ - компоненты тензора деформации.

В случае плоского напряженного состояния и равномерной деформации

$$\varepsilon_\rho = \varepsilon_\theta = -0{,}5\varepsilon_z; \ \gamma_{\rho z} = \gamma_{\rho\theta} = \gamma_{z\theta} = 0; \ \Gamma = \sqrt{3}\varepsilon_z \ . \qquad (4.23)$$

Переходя в выражении (4.21) к цилиндрической системе координат и выполняя интегрирование по φ, ρ и z в пределах от 0 до 2π, от r до R и от 0 до h_0 соответственно, получим

$$A_{BH} = \frac{\sigma_B \pi \left(R^2 - r^2\right) h_0}{\left(1-\varepsilon_i\right)\left(\varepsilon_i\right)^n (1+n)} \qquad (4.24)$$

Для определения сил трения используем принцип Сен-Венана, который позволяет для сравнительно высоких тел (с соотношением толщины стенки к высоте меньше 1) заменить систему реально действующих сил трения на систему с равномерным распределением сил трения:

$$\tau = \psi_1 T(\Gamma), \qquad (4.25)$$

где ψ_1 эмпирический коэффициент, учитывающий состояние трущихся поверхностей в форму очага деформации; $\psi_1 = \mu_1 + \frac{1}{8}\frac{b}{h_0}\left(1-\mu_1\right)\sqrt{\mu_1}$; $T(\Gamma)$ интенсивность касательных напряжений; $T(\Gamma) = \sigma_B \Gamma^n / \sqrt{3}\left(1-\varepsilon_i\right)\left(\sqrt{3}\varepsilon_i\right)^n$; μ_1 коэффициент трения; b - толщина стенки подкрепляющей втулки.

Таким образом, работу сил трения по торцам втулки можно представить в виде

$$A_{TP1} = 2\psi_1 \int_0^{2\pi}\int_r^R T(\Gamma) U_\rho \, \rho d\rho d\varphi \quad , \text{где } U_\rho = \frac{1}{2}\varepsilon\rho\left(1 - \frac{r^2}{\rho^2}\right). \qquad (4.26)$$

С учетом уравнения (4.23) соотношение (4.26) примет вид

$$A_{TP1} = \frac{2\psi_1 \sigma_B \pi \left[\frac{1}{3}\left(R^3 - r^3\right) - r^2(R-r)\right]}{\sqrt{3}\left(1-\varepsilon_i\right)\varepsilon_i^n} \varepsilon_z^{1+n} \qquad (4.27)$$

Работу сил трения, совершаемую по внутреннему контуру втулки можно определить аналогично:

$$A_{TP1} = \psi_1 \int_0^{2\pi}\int_r^{h_0} T(\Gamma) U_z \, r dz d\varphi = \frac{\psi_1 \pi \sigma_B r h_0^2}{\sqrt{3}\left(1-\varepsilon_i\right)\varepsilon_i^n} \varepsilon_z^{1+n} \quad , \text{где } U_z = \varepsilon_z z \, . \qquad (4.28)$$

Заменим работу внутренних сил листовой заготовки эквивалентной работой внешних сил:

$$A_{СОПР} = A_1 + A_2 , \qquad (4.29)$$

где A_1 - работа нормальных сил, раздающих отверстие; A_2 - работа сил трения по поверхности контакта "втулка - листовая заготовка".

$$A_1 = \frac{1}{2}\int_0^{2\pi}\int_0^{h_0} \sigma_r U_\rho R d\varphi dz , \qquad (4.30)$$

где σ_r - радиальное напряжение на контуре отверстия в заготовке:

$$\sigma_r = \left[k - \nu_{12} + N\left(\sin^2\varphi + k\cos^2\varphi\right)\right]\frac{U_r}{Rg};$$

$$k = \sqrt{\frac{E_1}{E_2}};\ N = \sqrt{2\left(k - \nu_{12}\right) + \frac{E_1}{G_{12}}};\ g = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{E_2} + \frac{k}{G_{12}};$$

E_1 и E_2 модули упругости материала листовой заготовки; ν_{12} и ν_{21} коэффициенты Пуассона; G_{12} - модуль сдвига.

Учитывая связь радиальных напряжений с перемещением U_r и соотношение (4.22), получим

$$A_1 = \frac{\pi R^2 h\left(1 - \dfrac{r^2}{R^2}\right)^2}{4g}\left[k - \nu_{12} + \frac{N}{2}(k+1) + \frac{N}{\pi}(k-1)\right]\varepsilon_z^2 \qquad (4.31)$$

Работу сил трения, возникающую при раздаче отверстия, определим по формуле

$$A_2 = \psi_2\int_0^{2\pi}\int_0^{h}\sigma_r U_r R\,d\varphi\,dz = \frac{\psi_2\pi R h^2\left(1 - \dfrac{r^2}{R^2}\right)}{4g}\left[k - \nu_{12} + \frac{N}{2}(k+1) + \frac{N}{\pi}(k-1)\right]\varepsilon_z^2, \quad (4.32)$$

где $\psi_2 = \mu_2 + \frac{1}{4}\frac{R}{h}\left(1 - \mu_2\right)\sqrt{\mu_2}$; μ_2 коэффициент трения между втулкой и стенкой отверстия листовой заготовки.

Учитывая выражения (4.20), (4.24), (4.27), (4.28), (4.31), (4.32), окончательно запишем:

$$A_{\Sigma} = \frac{\sigma_B\pi\left(R^2 - r^2\right)h_0}{\left(1 - \varepsilon_t\right)\varepsilon_t''(1+n)}\varepsilon_z^{1+n} + \frac{\psi_1\sigma_B\pi\left[\dfrac{2}{3}\left(R^3 - r^3\right) - 2r^2(R - r) + rh_0^2\right]}{\sqrt{3}\left(1 - \varepsilon_t\right)\varepsilon_t''}\varepsilon_z^{1+n} + \qquad (4.33)$$

$$+ \frac{\pi R h\left(1 - \dfrac{r^2}{R^2}\right)\left(R + \psi_2 h\right)}{4g}\left[k - \nu_{12} + \frac{N}{2}(k+1) + \frac{N}{\pi}(k-1)\right]\varepsilon_z^2.$$

Таким образом, используя выражения (4.19) и (4.33), можно найти силу, необходимую для деформирования втулки.

Для нахождения деформации втулки по ее внешнему контуру представим радиальные перемещения в виде функции

$$U_\rho = \frac{1}{2}a\rho\left(1 - \frac{r^2}{\rho^2}\right), \qquad (4.34)$$

где a - варьируемый параметр.

Уравнение (4.34) выбрано из условия равномерности раздачи внешнего контура подкрепляющей втулки по высоте.

Параметр a найдем из вариационного уравнения

$$\delta A_{Д}=\delta A_{ВН}+\delta A_{ТР1}+\delta A_{ТР2}+\delta A_{СОПР}=0 \qquad (4.35)$$

Используя уравнение (4.33) и известные соотношения для плоского напряженного состояния, получим

$$\Gamma = a\sqrt{3} \qquad (4.36)$$

Подставляя выражения (4.21), (2.26), (4.28)-(4.30) и (4.32) в уравнение (4.25) и выполняя варьирование по параметру a с учетом уравнения (4.36), запишем

$$\frac{\sigma_B}{\sqrt{3}(1-\varepsilon_i)(\sqrt{3}\varepsilon_i)^n(1+n)}\int_0^{2\pi}\int_r^R\int_0^h\frac{\partial\left(\Gamma^{1+n}\right)}{\partial a}\rho d\rho d\varphi dz+\psi_1\int_0^{2\pi}\int_0^h\frac{\partial\left[TU_\rho\right]}{\partial a}\rho d\rho d\varphi+$$

$$+\psi_1\int_0^{2\pi}\int_r^R\frac{\partial\left[TU_z\right]}{\partial a}rdzd\varphi+\frac{1}{2}\int_0^{2\pi}\int_0^h\frac{\partial\left\{\frac{U_\rho}{Rg}\left[k-\nu_{12}+N\left(\sin^2\varphi+k\cos^2\varphi\right)\right]U_\rho\right\}}{\partial a}Rd\varphi dz+ \qquad (4.37)$$

$$+\psi_2\int_0^{2\pi}\int_0^h\frac{\partial\left\{\frac{U_\rho}{Rg}\left[k-\nu_{12}+N\left(\sin^2\varphi+k\cos^2\varphi\right)\right]U_z\right\}}{\partial a}Rd\varphi dz=0.$$

Производя необходимые вычисления и используя для первого слагаемого метод приближенного дифференцирования, получим значение a в виде

$$a=\left(\frac{1{,}732\varepsilon_i^{1-n}\psi_1\sigma_B(1+n)B}{\sigma_B h_0 K+\dfrac{3\varepsilon_i^{1-n}hDML}{2g}}\right)^{\frac{1}{1-n}}, \qquad (4.38)$$

где

$$B=\frac{4}{3}\left(R^3-r^3\right)-2r^2(R-r)+h_0^2r;\quad K=3\left(R^2-r^2\right)-\frac{r^4}{R^2-r^2};$$

$$D=k-\nu_{12}N\left(\sin^2\varphi+k\cos^2\varphi\right);\quad L=\left(1-\varepsilon_i\right)\varepsilon_i^n;$$

$$M=\left(R^2-2r^2+\frac{r^4}{R^2}\right)+2\psi_2hR\left(1-\frac{r^2}{R^2}\right)$$

Зная a из соотношения (4.34) находим перемещение U_ρ по внешнему контуру втулки.

Из уравнения (4.38), задаваясь максимальным перемещением U_p, можно найти деформирующий ход

$$\Delta h = \left(\frac{\sigma_B h_0 K (ah)^{1-n}}{1{,}732 \psi_1 \sigma_B (1+n) B - \dfrac{3a^{1-n} hDML_1}{2g}} \right)^{\frac{1}{1-n}}, \qquad (4.39)$$

где $L_1=(k-\nu_{12}+N)$.

Для оценки полученных аналитических зависимостей были проведены экспериментальные исследования на подкрепляющих втулках из алюминиевого сплава Д16АТ, которые устанавливали в отверстия листовых заготовок из стеклопластика КАСТ-В толщиной 2 мм. Физико-механические свойства материала заготовок; E_1=20000 МПа; E_2=14000 МПа; ν_{12}=0,12; ν_{21}=0,085; G_{12}=4500 МПа. Геометрические размеры подкрепляющей втулки: r=3,5 мм; R=4,5 мм; h_0=2,2 мм; Δh=0,2 мм. Осевая деформация втулки составляла ε=0,1.

На рис.4.50 показаны результаты испытаний на усталость образцов, полученных путем вклеивания и радиальной раздачи втулки в отверстие. Метод постановки подкрепляющей втулки в отверстие на детали из КМ позволяет использовать его и для образования внутренних отверстий с резьбой или другой различной конфигурации (рис.4.51). Образование такого отверстия с резьбой производится при осевом сжатии втулки *3* (рис.4.52), выполненной из пластичного однородного материала. При этом другая втулка *2*, выполненная из высокопрочного материала, способствует полному заполнению материала пластичной втулки *3* резьбовых канавок стержня *4*. При осевом сжатии втулки *3* происходит также затекание ее материала в поперечные отверстия высокопрочной втулки и перемещение последней в радиальном направлении с формированием заданного поля упругих напряжений в КМ. В результате образуется отверстие с штампованной резьбой на внутренней поверхности втулки и реализуется эффект подкрепления стенок отверстия.

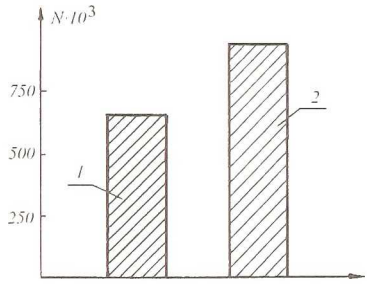


Рис.4.50. Влияние способа подкрепления на усталостную прочность соединения:

1 вклеивание; 2 вклеивание и радиальная раздача втулки (геометрические параметры R=6,0 мм; r=3,0 мм; h_0=4,4 мм)

Применение специальных заклепок с односторонним приложением сил для образования замыкающей головки также встречается

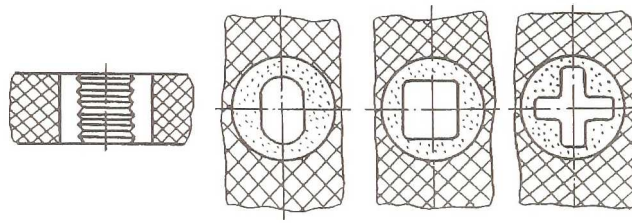


Рис.4.51. Конфигурация отверстий

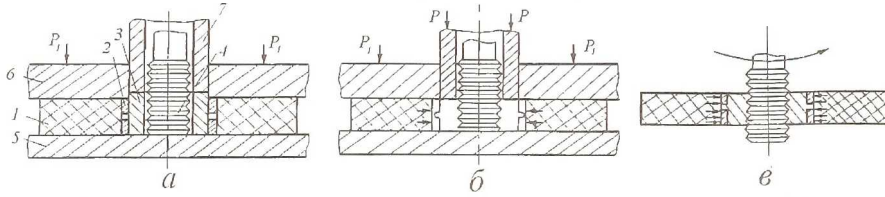


Рис.4.52. Способ формирования отверстий с резьбой в листовых деталях из КМ:
а, б, в - стадии процесса; 1 - листовая заготовка; 2 - втулка из жесткого материала; 3 - втулка из пластичного материала; 4 - резьбовой стержень; 5 - подштамповая плита; 6 - направляющая; 7 - пуансон

при изготовлении крупноразмерных рамных конструкций из замкнутых профилей разнообразной формы, где необходимо использовать большое число резьбовых отверстий для крепления разнообразных кронштейнов (кабелей и т.д.).

Так, например, применяя в рамных конструкциях КМ, типа бороалюминий, невозможно образовать резьбовые отверстия непосредственно в КМ, а необходимо поставить в отверстие подкрепляющую втулку с последующей нарезкой резьбы, как было описано выше, или применить специальные заклепки для односторонней клепки.

Технология установки гайки-пистона в профилях из бороалюминия выполняется в основном с применением ручных средств механизации в два этапа.

Первый этап образование отверстия в профиле на специальной оснастке с применением гидродинамического процесса пробивки с использованием магнитно-импульсного привода. Второй установка гайки-пистона и получение замыкающей головки с помощью ручного оборудования, конструктивно предусматривающего необходимую силу формообразования.

Обычно для получения такого крепежного элемента выбирается гайка-пистон по отраслевым нормалям в зависимости от толщины КМ и диаметра пробиваемого отверстия. Прочность такого крепежного элемента на бороалюминиевой композиции зависит от разрушения волокон в зоне отверстия, толщины КМ и диаметра закладной и замыкающей головки.

Для повышения производительности труда процесса и увеличения надежности крепежного элемента на профилях из

бороалюминия были разработаны способы подкрепления КМ в месте постановки гайки-пистона с одной и двумя шайбами.

При постановке гайки-пистона на бороалюминии толщиной 0,5-0,8 мм для увеличения статической нагрузки, воспринимаемой крепежным элементом, необходимо установить дополнительно две шайбы со стороны закладной и замыкающей головки заклепки. Это позволяет на порядок увеличить нагрузку воспринимаемую крепежным элементом. В процессе используется метод получения отверстия в склепываемом пакете пробивкой торцем стержня заклепки с одновременной ее установкой в отверстии и запрессовкой в кольцо-матрицу.

На рис.4.53. показаны стадии процесса постановки гайки-пистона двумя шайбами на профиль из бороалюминия. Профиль из бороалюминия *3* устанавливают на верхнюю линейку *1* оснастки для пробивки и прижимают направляющей планкой *5* с силой Р (рис.4.53, а). В направляющем отверстии линейки *5* устанавливают шайбу *4* совместно с гайкой-пистоном *6* и соосно с ними со стороны замыкающей головки, т.е. внутренней стороны профиля, располагают шайбу-матрицу *2*, размещенную в гнезде верхней линейки *1*. На головку гайки-пистона 6 воздействуют силой $P_{пр}$, которая обеспечивает перемещение гайки-пистона, пробивку отверстия в профиле с торцем стержня с одновременной установкой гайки-пистона в этом отверстии и запрессовки ее в шайбе-матрице *2* (рис.4.53, б).

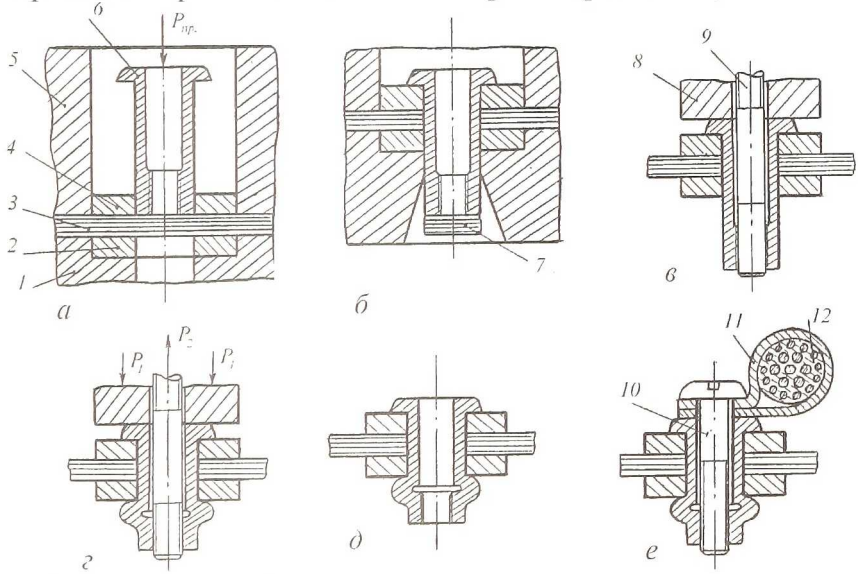


Рис.4.53. Стадии процесса образования крепежного элемента:

1 - верхняя линейка; 2 - шайба-матрица; 3 - профиль; 4 - шайба; 5 - направляющая линейка; 6 гайка-пистон; 7 отход; 8 инструмент; 9 наконечник; 10 - винт; 11 хомут; 12 - кабель

При этом шайба *4* играет роль направляющей для гайки-пистона. Затем оснастка для пробивки удаляется , ввертывается в гайку-пистон *6* наконечник *9* и устанавливается инструмент *8* для формообразования замыкающей головки (рис.4.53, в). Замыкающая головка получается при приложении текущей силой P_1 к наконечнику *9* при одновременном прижиме инструмента *8* с силой P_2 к закладной головке (рис.4.53, г). После формообразования замыкающей головки наконечник *9* вывертывается и снимается инструмент (рис.4.53, д). Резьба при этом сохраняется и ее можно применять для крепления хомутика *11* с кабелем *12* винтом *10* (рис.4.53, г).

Установленные шайбы позволяют на порядок повысить статическую прочность такого крепежного элемента, как в направлении нагрузки внутрь профиля, так и на отрыв во внешнюю сторону.

При увеличении толщины стенки профиля до 1,0...3,0 мм получить отверстие пробивкой торцем гайки-пистона невозможно. Для этого случая разработан способ получения крепежного элемента пробивкой отверстия специальным пробойником.

На рис.4.54 показаны стадии процесса постановки крепежного элемента, состоящего из гайки-пистона и шайбы, на профиле из бороалюминия.

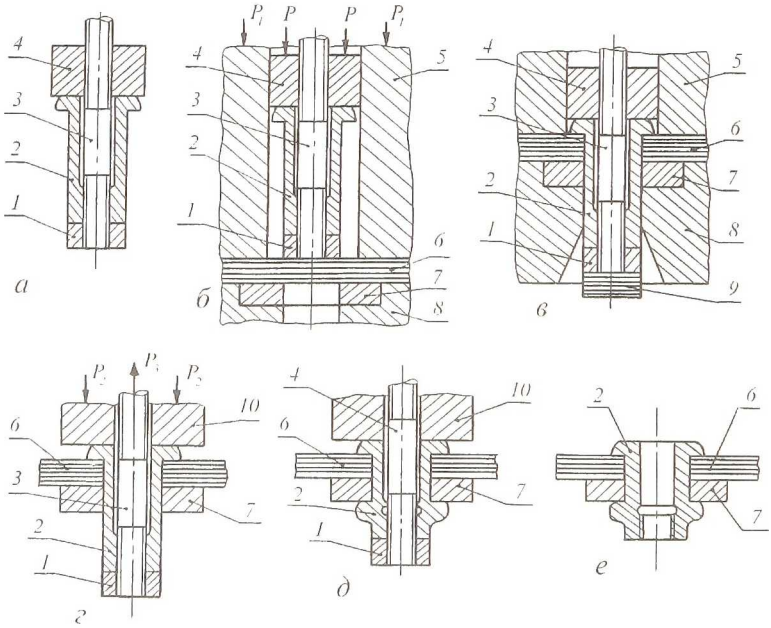


Рис.4.54. Стадии образования крепежного элемента:
1 пробойник; 2 гайка-пистон; 3 наконечник; 4 направляющая шайба; 5 направляющая втулка; 6 - профиль; 7 - шайба-матрица; 8 - верхняя линейка; 9 - отход; 10 - инструмент

Разработанный технологический процесс заключается в том, что предварительно в гайку-пистон *2* (рис.4.54, а) устанавливают наконечник *3*, на который навинчивают со стороны замыкающей головки пробойник *1*, диаметром равным диаметру гайки-пистона, а со стороны закладной головки навинчивают направляющую шайбу *4*. Собранный элемент устанавливают в направляющую втулку *5* на пробивной оснастке и соосно с ним со стороны замыкающей головки, т.е. внутренней стороны профиля *6*, располагают шайбу-матрицу *7*, размещенную в гнезде верхней линейки *8* (рис.4.54, б).

Верхнюю стенку профиля *6* прижимают направляющей *5* с силой P_1, а затем на направляющую шайбу *4* воздействуют силой P_2. Происходит процесс пробивки отверстия в КМ пробойником *1* с одновременной установкой гайки-пистона в этом отверстии и запрессовки ее в шайбе-матрице *7* (рис.4.54, в).

Затем оснастку для пробивки отверстий удаляют и устанавливают инструмент *10* для формообразования замыкающей головки. Она образуется при приложении тянущей силы P_3 к наконечнику *3* при одновременном прижиме инструмента 10 с усилием P_2 к закладной головке (рис.4.54, г). В процессе формообразования замыкающей головки гайки-пистона *2* играет большую роль пробойник *1* (рис.4.54, д), так как в этом случае сила формообразования передается гайке-пистону *2* не по резьбе, а по торцу, что способствует сохранению резьбы на гайке-пистоне и лучшему формообразованию замыкающей головки.

После окончания процесса вывертывается наконечник *3* и пробойник *1*. Резьба на гайке-пистоне сохраняется и крепежный элемент (рис.4.54, е) можно использовать для крепления деталей к профилю с помощью винтов.

Установленная шайба *7* позволяет повысить статическую прочность крепежного элемента на отрыв во внешнюю сторону профиля. Таким же способом можно получать крепежный элемент на профилях из бороалюминия с двумя шайбами. Пробойник изготавливают из стали У10А, толщиной 4-5 мм, диаметром равным диаметру стержня гайки-пистона. Он может быть использован для пробивки 1000...1500 отверстий в профилях из бороалюминия толщиной 1,5...3,0 мм.

5. ОБЩАЯ СБОРКА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

5.1. Содержание и объем работ общей сборки летательных аппаратов

Как было отмечено, технологический процесс общей сборки (ОС) является завершающим и наиболее ответственным этапом производства ЛА. Надежность ЛА, его важнейшие параметры в значительной степени определяются уровнем технологии сборки и её качеством. В процессе сборки выявляются многие дефекты предшествующих технологических процессов, а также (связанная со сборкой) технологичность изделия. Произвольные отступления от основных требований технологии сборки, предусмотренных в соответствующей документации, служат, как правило, причиной выхода ЛА из строя при испытаниях или эксплуатации.

Процесс ОС отличается сложностью, так как в отличие от предшествующих процессов, объектами которых служат детали, подсборки, объектами его являются сложные специфические изделия до законченных блоков и двигателей включительно.

Процесс сборки характеризуется, во-первых, многообразием выходных параметров (геометрических, кинематических, электрических и др.), свойственных изделиям в целом; во-вторых, сложностью и недостаточной изученностью сопутствующих физических явлений, например, деформация деталей, контактные напряжения и др., что затрудняет расчеты ожидаемой точности и обеспечение заданных значений выходных сборочных параметров; в-третьих, чрезвычайным многообразием рабочих движений, воспроизведение которых в автоматических сборочных системах и машинах затруднено, а подчас и невозможно, чем, главным образом, объясняется весьма низкий уровень механизации и автоматизации сборочных работ. Трудоемкость процессов ОС составляет в настоящее время в среднем 25...35% от общей трудоемкости изготовления ЛА и в связи с отставанием по темпам механизации от других процессов производства продолжает расти. Поэтому механизация и автоматизация сборки является одной из главных и неотложных задач в области технологии сборки. Однако она не может быть решена без участия конструкторов, так как предъявляет свои специфические требования к разработке конструкции деталей и узлов.

С развитием авиационной и космической техники повышаются требования к точности сборочных параметров и качеству сборки ЛА в целом. Постоянно возникают новые задачи, как, например, обеспечение технической стерильности при сборке некоторых частей

ЛА, исключение влияния статического электричества на некоторые радиоэлементы и т.д.

Технологические процессы сборки представляют собой процесс соединения взаимоориентируемых составных частей изделия, осуществляемых в определенной последовательности различными способами. Процесс ОС изделия в полной мере зависит от его конструкции и состава. Поэтому несмотря на то, что к настоящему времени объем производства ЛА достиг огромных размеров, унифицированной схемы ОС нет. Можно говорить о типовых технологических процессах определенных классов ЛА. В целом же каждое изделие имеет свою технологию сборки.

К процессам ОС предъявляются следующие требования:

- работы по сборке и монтажу оборудования и систем должны быть проведены на этапе агрегатной сборки;
- сборочные работы должны быть организованы по принципу поточного производства, это упрощает сборку и транспортировку ЛА;
- должна быть предусмотрена возможность наземной отработки и испытания систем.

Рассмотрим основные этапы технологического процесса ОС самолетов [70, 72]:

- предварительная стыковка агрегатов и нивелировка самолета;
- монтажные работы;
- стыковка агрегатов и окончательная сборка;
- испытание систем самолета;
- отделочные работы.

Предварительную стыковку агрегатов производят в случае, если некоторые агрегаты (отсеки фюзеляжа, крылья, оперение и т.д.) невзаимозаменяемы в силу конструктивных особенностей. Целью предварительной стыковки является проверка положения агрегатов относительно друг друга, крепление их в зафиксированном положении, совместная обработка стыковочных отверстий и узлов. При предварительной стыковке соединяют агрегаты или секции фюзеляжа, фюзеляж с центропланом и с гондолами двигателей; навешивают шасси, пристыковывают полукрылья и оперение. Далее выполняют нивелировку самолета и снова все расстыковывают для удаления посторонних предметов и пыли, а также для предварительной окраски отсеков и монтажа. Для окраски изделие направляют в цех покрытий или в специальную мастерскую цеха ОС.

В цехе ОС выполняют монтажные работы, не включенные в объем работ агрегатных цехов. На полностью состыкованном самолете монтируют двигатели, шасси, систему управления самолетом, топливную систему, систему отопления, вентиляции, электро- и радиооборудование, приборы контроля, бытовое оборудование и т.п.

На все агрегаты планера при стапельной сборке наносятся реперные точки, которые являются физическими носителями базовых осей агрегатов. При стыковке самолета в стенде один из агрегатов (обычно фюзеляж или центральная часть фюзеляжа) устанавливается по реперным точкам в рабочее полетное положение и к этому агрегату, который принимается за базовый, последовательно присоединяются все остальные агрегаты. Установка присоединяемых агрегатов производится с помощью тележек и домкратов стенда путем совмещения с требуемой точностью реперных точек агрегатов с измерительными устройствами стенда. После закрепления агрегатов осуществляется совместная разделка стыковых отверстий.

При стыковке самолета из взаимозаменяемых агрегатов они устанавливаются на стендовые тележки, совмещаются стыковые отверстия, устанавливаются стыковые болты и агрегаты автоматически занимают правильное полетное положение. После этого производится проверка правильности установки агрегатов по реперным точкам с помощью оптических приборов.

Кроме стыковочных стендов в состав специального оборудования цеха ОС входят стенды для безнивелировочного соединения агрегатов, для испытания герметичности топливной, дренажной и других систем, для опрессовки и испытания пневматических и гидравлических систем, для испытания герметичности кабин самолета, для проверки переходных сопротивлений, радиооборудования и многое другое. Число стендов зависит от типа самолета, его назначения и масштабов производства.

Например, монтаж двигательных установок и систем управления двигателя осуществляется с помощью специального стенда, на котором монтируют двигательные и самолетные агрегаты, патрубки, трубопроводы и электропроводку. Если предусмотрено технологическим процессом, то монтируют и отдельные части капота. Подготовленный двигатель снимают краном со стенда и устанавливают на самолет, где производят дальнейший монтаж. Правильность положения оси двигателя проверяют нивелиром, теодолитом или специальными приспособлениями, установленными на узлы фюзеляжа. Допуски на отклонение оси двигателя от теоретического её положения зависят от характеристик самолета и задаются главным конструктором. Регулирование положения двигателя сводится к совмещению его оси с осью самолета в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Шасси в зависимости от принятой схемы сборки монтируют или в агрегатно-сборочном цехе на соответствующем агрегате (крыле, центроплане, фюзеляже), или при общей сборке самолета. Монтаж шасси на агрегатах более характерен для легких самолетов. В монтаж шасси входят операции постановки механизма уборки, присоединения проводов управления и комплексной проверки и регулирования всей

установки, открытия и закрытия створок, выпуска и подъема шасси, тормозной системы, сигнализации.

Механические системы управления включают в себя систему управления полетом, силовой установкой, выпуском и уборкой шасси, катапультированием. Силы в таких системах передаются с помощью многозвенных механизмов, состоящих из тяг, тросов, качалок и других узлов. Монтаж функциональных элементов систем управления осуществляется в основном с базированием их на плоскость или в проушины с совмещением отверстий. Тяги прокладывают по роликовым направляющим. Для соединения тяг друг с другом и качалками применяют вильчатые разъемы.

При монтаже трубопроводных систем на деталях планера сначала устанавливают гидроагрегаты, предварительно расконсервированные и проверенные в лаборатории входного контроля на чистоту внутренних поверхностей, герметичность и качество функционирования. Гидроагрегаты устанавливают в основном по сборочным отверстиям в корпусах агрегатов и элементах конструкции. Затем производят установку и крепление монтажных панелей и установку перемычек металлизации. Трубопроводы между собой и с гидроагрегатами по наружному и внутреннему конусу соединяют затяжкой накидных гаек. Перед соединением трубопроводов проверяют монтажные неточности: недотяг, несоосность и перекос.

К основным электромонтажным работам, проводимым на самолете, относятся: установка и крепление функциональных элементов, прокладка, крепление и стыковка между собой жгутов, шин и кабелей и присоединение их к функциональным элементам. Функциональные элементы крепят с помощью замков, винтов и хомутов, а жгуты - с помощью скоб, хомутов и замков.

Основное требование к монтажным работам на самолете - это исключение операций с образованием стружки, пыли, грязи и т.д.

После завершения стыковочных и монтажных работ самолет транспортируется на КИС, где проводится отработка и настройка систем самолетного оборудования и подготовка его к летным испытаниям.

Так как конструкции КА наиболее насыщены различными приборами и системами, сборка их имеет свои специфические особенности. Выделяют следующие основные этапы ОС [71]:

- предварительная сборка изделия для электрических испытаний систем механически разобранного объекта;
- окончательная сборка изделия, стыковка его основных частей;
- заключительные сборочные работы.

На первом этапе на панелях, отсеках, блоках, полученных из агрегатных цехов, выполняются следующие работы. Устанавливаются герморазъемы и уплотнения. Контроль герметичности проводят

методом щупа, обдува и в вакуумной камере методом нагнетания. Производится монтаж агрегатов пневмогидросистемы. Устанавливают клапаны, редукторы, датчики, крепят их с помощью болтов, шпилек по посадочным плоскостям и отверстиям, выполненным в агрегатных цехах по согласованным кондукторам. Выполнение сверловочно-подгоночных работ при этом, как правило, не допускается. Производят монтаж трубопроводов и воздуховодов систем.

В конструкциях КА используются как неразъемные (сварные, паяные), так и разъемные (фланцевые) соединения трубопроводов и воздуховодов. Сварку выполняют в монтажных условиях с использованием защитной атмосферы малогабаритными сварочными головками. Пайку производят высокотемпературными припоями. Подгибка трубопровода, установленного на изделии, запрещается. При стыковке трубопровода монтажные неточности должны лежать в пределах допуска. Крепление трубопровода производится хомутами, специальными скобами или колодками после подсоединения обоих концов трубопровода. Проверяется герметичность монтажей ПГС и срабатывание элементов автоматики. На данном этапе герметичность монтажей проверяется обычно методом щупа.

Целью испытаний на срабатывание является проверка правильности сборки систем, подачи давления в нужные полости, отсутствие монтажных напряжений, контролируемое плавностью хода, силой потребляемого тока, отсутствием скрежета, постороннего шума. Проверяют также, чтобы функционирование одних агрегатов или механизмов не привело к поломке других или не вызвало выход из строя проверяемого агрегата. Производят монтаж жгутов и кабелей; устанавливают блоки и приборы комплектующих систем. Проводят прозвонку электрожгутов и кабелей, проверку сопротивления изоляции и разобщения цепей. Осуществляют общий технический осмотр с целью контроля за состоянием изделия, соответствием его ТУ. После выполнения этих операций изделие представляет собой подсборки отсеков, баков, рам, солнечных батарей, проставок с выполненными монтажами и проведенными проверочными работами. В таком виде изделие передается на КИС для электрических испытаний механически разобранного объекта. Электрически изделие представляет собой одно целое, так как составные части изделия соединены между собой через технологические жгуты - переходники.

После электрических проверок механически разобранного изделия начинается второй этап окончательной сборки. Производится установка рам с приборами в отсеки. Операция выполняется с помощью специальных подъемников и траверс. Подключаются электроразъемы кабелей и жгутов. Окончательно крепятся части жгутов, подходящих к приборам и блокам. Устанавливаются крышки, герметизируются отсеки.

Производится стыковка отсеков, блоков, баков между собой. Операция выполняется с помощью подъемных средств, при этом необходимо на всех стыкуемых агрегатах контролировать совмещение осей стабилизации. Стыковка производится с помощью болтовых или шпилечных соединений.

Устанавливаются солнечные батареи, антенны, выносные элементы и механизмы. Состыкованные отсеки устанавливаются в стапель сборки изделия, который должен обеспечить подходы к любой точке изделия, дать возможность при необходимости проверить работу механизмов. Окончательно собираются наружные жгуты и кабели, стыкуются электроразъемы. Проверяется герметичность отсеков и систем изделия. На этом этапе методом щупа проверяются разъемные соединения, состыкованные в процессе работы по второму этапу окончательной сборки, и методом натекания в вакуумной камере проверяется общая негерметичность полостей. Проводится юстировка изделия и установка экранно-вакуумной изоляции.

Проверяется раскрываемость элементов и механизмов изделия и поля зрения оптических приборов. Проводится примерка с головным обтекателем. Примерка проводится, чтобы убедиться в том, что после всех монтажных работ на изделии зона под обтекателем, выделенная для полезной нагрузки, обеспечена и в местах работы механизмов раскрытия обтекателя имеются необходимые зазоры. Изделие устанавливают на плиту, имитирующую плоскость стыковки с ракетой-носителем, и на него надвигается обтекатель.

Далее изделие поступает на окончательные электрические испытания собранного комплекса, в ходе которых проигрываются в реальном времени все стороны его полета. По результатам этих испытаний дается допуск всех систем к летной эксплуатации, и изделие передается на третий этап окончательной сборки.

Одной из важных операций ОС является стыковка отсеков, блоков, баков между собой. К точности взаимного расположения агрегатов предъявляют высокие требования. Допуски на угловой перекос осей стыкуемых отсеков нередко находятся в пределах 3...5', а смещение осей 0,1...0,3 мм. Высокие требования предъявляют к точности расположения центра тяжести, совпадению оси аппарата с осью инерции, не допускают деформации и перекосов в стыкуемых узлах, неравномерность затяжки соединений. После завершения сборочных работ проводят испытания изделия на герметичность, определение положения центра масс, взвешивание, контроль юстировки приборов и механизмов раскрытия антенн. Все механизмы и раскрывающиеся элементы устанавливают в транспортное положение, проводят консервацию, упаковку и комплектацию запасных элементов и принадлежностей (ЗИП). Рассмотрев основные этапы ОС самолетов и КА, более подробно остановимся на процессе ОС РН.

5.2. Организация производства общей сборки ракеты-носителя

Основным методом организации процесса ОС РН на заводах является поточный с тележками, движущимися по рельсам, и стационарно оборудованными рабочими местами и стендами для испытаний, обмеров, балансировки, а также монтажа отдельных отсеков в вертикальном положении.

Линия сборки должна планироваться так, чтобы транспортировка деталей, материалов, приспособлений и готовой продукции была сведена к минимуму. Часто метод поставки готовой продукции определяет порядок и место окончания линии сборки. Если самолеты транспортируют на место испытания двигателей, а затем выкатывают на летное поле, откуда они могут улететь, то ракеты заканчивают собирать и упаковывать на участке погрузочной эстакады.

Начало линии должно начинаться вблизи участков, на которых ведется подсборка узлов. Если линии могут быть полностью замкнутыми, то каретки и подвижные тележки с несущими узлами не надо возвращать к начальной позиции сборочной линии, что уменьшает крановые работы или сокращает необходимые площади. Сборочная линия может быть последовательной, параллельной или комбинированной. При последовательной линии сборка ракеты производится полностью на одной линии. При параллельной подсборка узлов ведется на отдельных коротких линиях, а уже узлы (отсеки) собираются на главной линии ОС [5].

Процесс ОС должен обеспечивать минимально возможный производственный цикл, определяемый следующей зависимостью:

$$Ц = T/P_0, \qquad (5.1)$$

где T трудоемкость процесса в человеко-часах; P_0 количество рабочих, одновременно участвующих в процессе.

Как видно из (5.1), уменьшение цикла сборки связано с уменьшением её трудоемкости или максимальным расширением фронта работ. Трудоемкость может быть уменьшена за счет уменьшения объема и номенклатуры работ на ОС, путем вынесения ряда монтажных операций на агрегатную сборку и подачу на ОС максимально завершенных монтажных агрегатов.

Расширение фронта работ (число одновременно работающих) зависит от типа ракеты, её размеров и возможности членения на отсеки.

Поточная сборка может быть организована не обязательно в виде непрерывно движущейся линии конвейера с определенным тактом его движения. Она может производиться на определенных неподвижных рабочих местах, оборудованных для конкретных работ, указанных в схеме ОС РН с подачей на эти рабочие места подсборок, блоков с помощью мостовых кранов. Пульсирующие конвейеры

применяются при относительно больших тактах производства или при относительно малых программах выпуска изделия.

Рабочий такт рассчитывают по формуле

$$\tau_{П}=\Phi_{ДР}/П\ , \qquad (5.2)$$

где $\tau_{П}$ рабочий такт, т.е. промежуток времени, через который готовое изделие сходит с конвейера, ч; $\Phi_{ДР}$ действительный (расчетный) фонд времени рабочего места в планируемый период времени, ч; $П$ программа выпуска РН за этот же период, шт.

Такт пульсации потока определяется по формуле

$$\tau_{ПП}=\tau_{П}-t_{ПЕР}\ , \qquad (5.3)$$

где $t_{ПЕР}$ - время перемещения конвейера с одной позиции на другую, ч.

Число стендов $C_{Р}$ на поточной пульсирующей линии зависит от трудоемкости данного вида работ, такта конвейера и средней плотности работ:

$$C_{Р}=T_{СБ}/\tau_{ПП}n, \quad [C_{Р}]=C_{ПР}\ , \qquad (5.4)$$

где $T_{СБ}$ трудоемкость вида работ на одну РН, чел.-ч; n средняя плотность работ или число рабочих, одновременно работающих на одном стенде; $C_{ПР}$ - принятое число стендов (рабочих мест).

Длина рабочей зоны стенда равна

$$L=l+l_{п}\ , \qquad (5.5)$$

где l - длина стенда, м; $l_{п}$ - расстояние между двумя стендами, м.

Длина всей конвейерной линии определяется по формуле

$$L_{КЛ}=C_{ПР}L\ . \qquad (5.6)$$

Скорость движения конвейерной линии находится из зависимости

$$V_{К}=L/t_{ПЕР}\ . \qquad (5.7)$$

Скорость движения пульсирующего конвейера принимается равной 1…3 м/мин.

Непрерывно действующий конвейер является более высокой формой организации производства. Расчет основных параметров непрерывной поточной линии производится так же, как и пульсирующей поточной линии.

Скорость непрерывного конвейера можно определить по следующей формуле:

$$V_{К}=L/\tau_{П}\ , \qquad (5.8)$$

где $V_{К}$ - принимается в пределах от 0,25 до 3,5 м/мин.

Основным техническим документом поточной линии сборки является цикловой график сборки, в котором дано: краткое содержание объема работ по каждому заданию; последовательность выполнения работ, определяемая последовательностью стендов линии; длительность выполнения каждого задания и каждого объединения на потоке (ритм линии); нормы времени; число одновре-

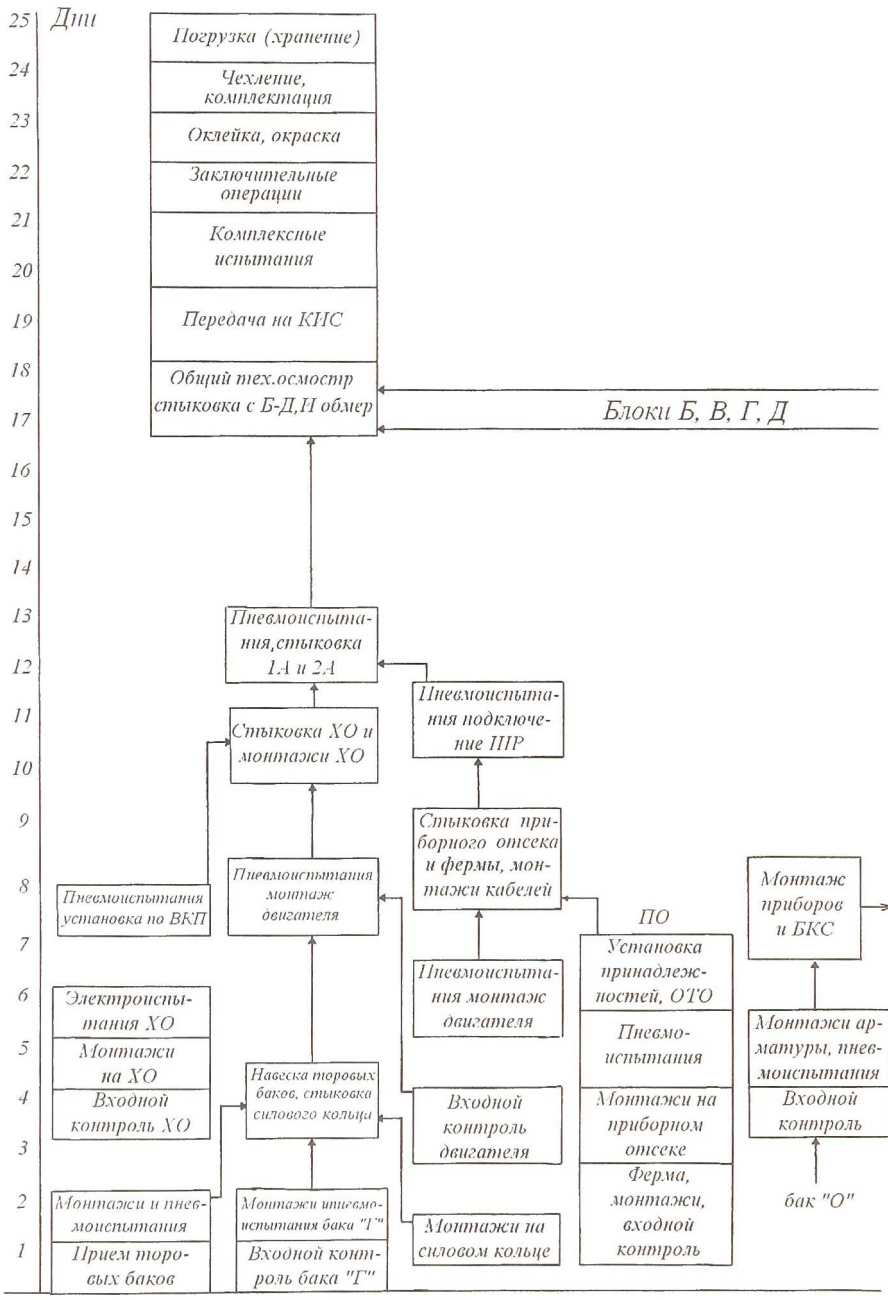
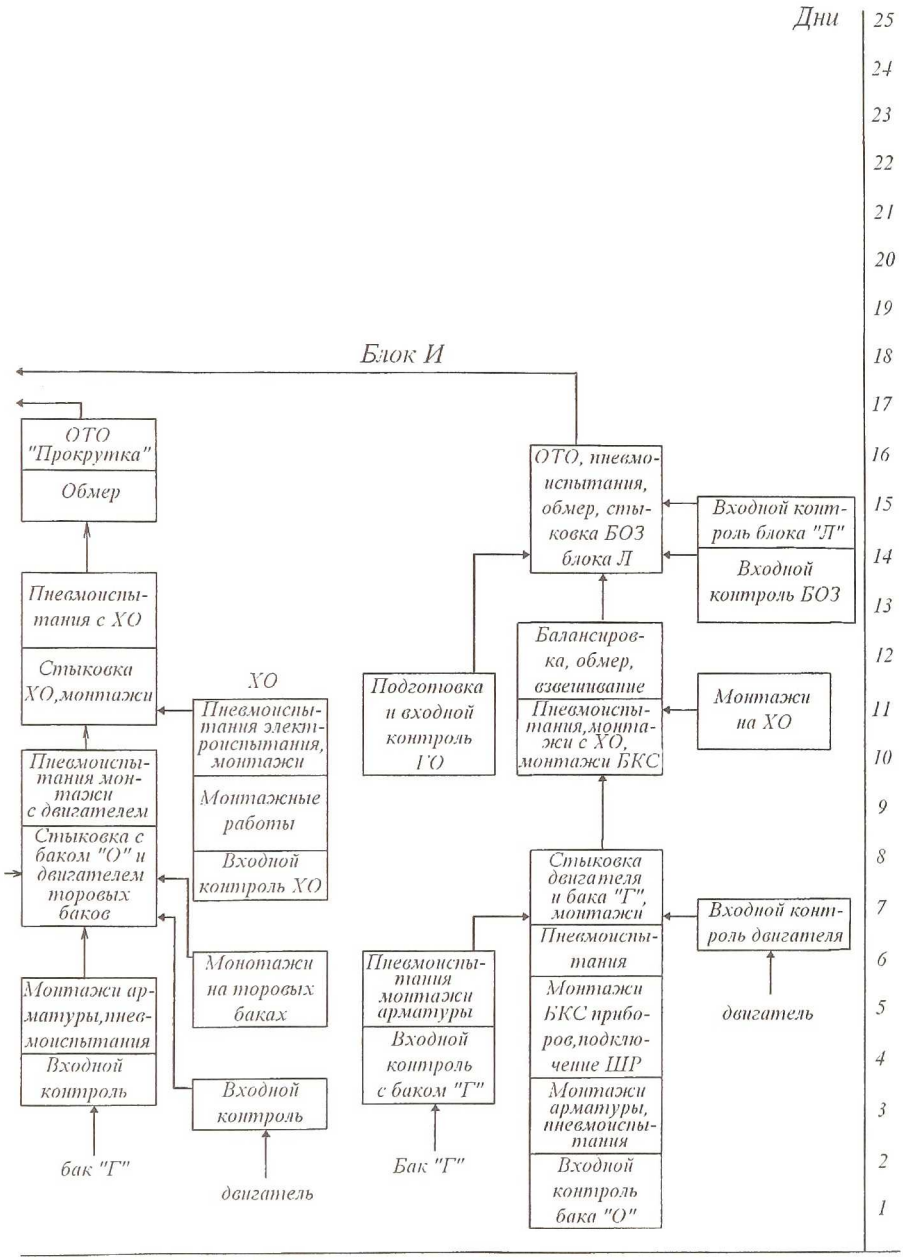


Рис.5.1. Схема и цикловой график общей



сборки РН "Молния" для двухсменной работы

менно работающих по каждому заданию и объединению; схемы и иллюстрации к работе на отдельных стендах.

После определения необходимого числа рабочих мест и числа отдельно собираемых отсеков определяется время сборки каждого из них. При этом в цикловом графике ОС намечаются узловые точки, т.е. моменты времени, когда все отсеки или части их должны быть поставлены на определенные рабочие места. Например, к моменту стыковки двигателя и бака двигатель должен пройти входной контроль, а в баке смонтирована арматура и проведены пневмоиспытания. Наиболее регламентирующими такими узловыми точками являются момент контроля стыкуемости всех блоков и передача их на КИС.

В связи с различным временем предварительной сборки отсеков часть из них закладывается на сборку раньше с таким расчетом, чтобы к контрольным точкам они подошли одновременно. Поэтому в производстве составляется график ОС на каждое изделие, в котором и отражаются указанные сдвиги и время выхода каждого отсека в узловые точки. На каждое рабочее место в определенной последовательности (по графику) поступает силовой каркас отсека (бак, каркас переходного или хвостового отсека и т.д.). На поточных линиях они чаще размещаются на монтажных тележках в горизонтальном положении.

Каждый каркас отсека имеет строго выверенные оси и базовые сечения. Оси обозначаются по двум взаимно перпендикулярным плоскостям нанесением реперных точек, по которым они и ориентируются на монтажных тележках.

Некоторые отсеки удобнее собирать в вертикальном положении, как, например, приборные и хвостовые отсеки, фермы, переходные отсеки, которые переводятся в горизонтальное положение при их стыковке в блоки.

Для лучшего понимания вопросов, решаемых в процессе ОС, рассмотрим схему и цикловой график ОС РН "Молния" (рис.5.1).

Из рис.5.1. видно, что общая сборка ракеты может осуществляться как сборка самостоятельных блоков, следовательно, необходима организация нескольких линий ОС или изготовление отдельных блоков на другом предприятии (например, блок Л). Однако общая сборка предполагает совместную отработку всех блоков и проверку на взаимозаменяемость и комплектацию блоков, поставляемых в эксплуатирующие организации. При этом проверки проводятся на определенных рабочих местах и связаны с определенным циклическим временем процесса ОС. В схеме ОС предусмотрены узловые точки (место и время), где должны быть одновременно все или часть блоков. Такими узловыми точками для данной ракеты являются время общего обмера с блоком А, где проверяется и регулируется стыковка

в пакет и с блоком И, а также подача всех блоков для комплексных испытаний на КИС и готовность к отправке всей системы РН.

В связи с тем, что трудоемкость ОС каждого блока различная, то и число рабочих мест для сборки частей (отсеков) блоков тоже разное. Другой выход - смещение времени закладки отсеков блока по времени, что регулируется циклограммой ОС.

Наиболее продолжительной линией ОС является линия сборки блока А, в цепи которой выделены следующие рабочие места: монтажи на баках горючего и окислителя и их пневмоиспытания; стыковка двигателя с баком и пневмоиспытания; стыковка сборок 1А и 2А и пневмоиспытания; обмер и общий технический осмотр блока А; испытания на КИС; окраска и оклейка, маркировка; чехление, погрузка, комплектация.

Из схемы также видно, что с целью расширения фронта работ и сокращения времени такта передачи блока с одного рабочего места на другое ряд монтажно-сборочных работ вынесен с общей линии на параллельные, специально оборудованные рабочие места. К ним относятся: монтаж торовых баков; монтаж хвостового отсека (ХО); монтаж приборного отсека (ПО); входной контроль двигателя; монтаж на ферме; монтаж на силовом кольце.

Аналогично построены работы по линиям сборки и других блоков.

5.3. Технические условия на общую сборку

На каждое изделие разрабатываются технические условия (ТУ) их изготовления, которые действуют совместно с отраслевыми стандартами, конструкторской и другой документацией, указанной в списке документов на это изделие. Такие ТУ разрабатываются конструкторами, создателями изделия и согласуются с предприятием-изготовителем изделия. Они являются как бы развитием требований директивной технологии.

ТУ на изготовление изделия обычно состоят из следующих разделов:

1. Технические требования (общие требования, требования к производственным помещениям, материалам и полуфабрикатам, к изготовлению узлов и деталей, к сборке, к комплектности изделия).
2. Правила приемки изделия.
3. Методы контроля.
4. Хранение и отправка изделия.
5. Гарантии поставщика.
6. Порядок обновления ЗИП.

Кроме того, техническими условиями оговаривается перечень ответственных операций, более детально разрабатываются некоторые технологические процессы (например, обмер изделия). Кроме об-

щих ТУ ОС разрабатываются частные ТУ на монтажи пневмогидравлической системы, бортовой кабельной сети, приборов испытаний и др. Часть из них может быть общей для отрасли и является ОСТами.

Согласно техническим требованиям работы следует выполнять аттестованными исполнителями. На изготовленные узлы, приборы и комплектующие необходимо иметь заключение изготовителей об их годности и гарантийные обязательства. До начала испытаний изделия должны быть выполнены все экспериментальные работы. Предприятию-изготовителю необходимо следить за стабильностью основных параметров изделия при их испытаниях и работе. Предприятие-разработчик (ОКБ) должно осуществлять авторский надзор в соответствии с ГОСТами. При изготовлении изделия следует обеспечивать его чистоту. Помещения для окончательной сборки должны удовлетворять санитарным нормам проектирования промышленных предприятий, обеспечивать температуру не ниже 8°С и не выше 25°С с суточным колебанием температуры не более 10°С и влажностью в пределах от 30 до 70%. Запыленность в цехе ОС не должна превышать 1 мг/м^3.

Требованиями на изготовление узлов и агрегатов допустимое отклонение на смещение реперного знака при нанесении его на поверхность изделия ограничивается 0,3 мм от номинала. Допуск на нанесение реперных знаков и погрешность измерения входят в заданные допуски на обмер.

Сжатый воздух, поступающий в изделие, его агрегаты, узлы и детали при пневмоиспытаниях, должны удовлетворять требованиям, оговоренным в соответствующих ОСТах. При замене и установке приборов слесарные подгоночные работы не допускаются. Места крепления должны обеспечивать полную их взаимозаменяемость. В случае разрешения сверловочных работ на агрегатах, на которых установлены приборы или проложена бортовая кабельная сеть, запрещается пользоваться пневмодрелью.

Резьбы деталей и паранитовые прокладки перед их установкой в сборки должны быть смазаны соответствующим смазочным материалом. При нанесении смазочного материала не допускается попадания его вовнутрь трубопроводов и емкостей. На наружную поверхность каждого клепаного отсека корпуса после нанесения шпатлевки должна быть нанесена грунтовка. В случае использования крепежных элементов изделия (винты, болты) для крепления съемных принадлежностей разрешается частичное или полное вывертывание крепежных элементов. После снятия с изделия съемных принадлежностей крепежные элементы должны быть завернуты в соответствии с чертежом изделия.

До монтажа пиросредств на изделия необходимо произвести все максимально возможные работы по сборке, т.е. операции установки пиросредств должны быть отнесены на последнюю стадию сборки.

Стыковка блоков 1А и 2А между собой на заводе в процессе изготовления и сборки изделия производится один раз, за время эксплуатации не более 3 раз. Стыковка баков А и И должна производиться на заводе и в эксплуатирующей организации не более 3 раз. Баковые блоки необходимо стыковать с центральным блоком по плоскостям стабилизации. Число стыковок в пакет не должно превышать 25, при этом на заводе-изготовителе - 5 раз.

Неплотность прилегания к опорным поверхностям крышек люков обтекателей допускается не более 1 мм (кроме случаев, оговоренных в чертежах). При этом допускается подсадка обтекателей. На баках, прошедших гидравлические и пневматические испытания, подсадка обтекателей не допускается. Крышки люков изделия и принадлежностей должны быть замаркированы, запломбированы в соответствии со схемой пломбировки и маркировки изделия и принадлежностей. На поверхностях деталей, идущих на повторную сборку, допускается наличие следов от керновки.

Все отсеки корпуса с элементами клепаной конструкции в количестве двух изделий от годовой партии, по согласованию с представителем заказчика, необходимо подвергать испытаниям на влагозащищенность дождеванием согласно программе с интервалом не более шести месяцев после их изготовления. Один раз в год по совместному решению завода и представителя заказчика следует проводить дождевание корпуса одного изделия в горизонтальном положении. Изделия, от партии которых проверялось дождевание, подвергаются доработке по выявленным замечаниям.

Подъем, транспортировка, укладка агрегатов, отсеков, блоков и изделий производятся в соответствии со схемой монтажных опор изделия. К выполнению такелажно-транспортировочных работ допускаются рабочие, прошедшие инструктаж, обучение, аттестацию. При выполнении такелажно-транспортировочных операций используется проверенная, испытанно-аттестованная грузоподъемная оснастка.

ТУ требуют на всех изделиях проводить проверку взаимной механической стыкуемости элементов изделия и полезной нагрузки (КА).

После окончания сборки изделия (до испытания и после испытания на КИС) производится его простукивание резиновыми или фибровыми молотками с последовательной прокруткой на предмет выявления посторонних предметов.

Нахождение изделия без гермоупаковки при хранении на заводе-изготовителе не должно превышать 1 месяца после проведения заключительных операций на КИС. Каждый собранный и окрашенный блок изделия должен быть взвешен. Условиям взаимозаменяемости по установочным местам и плоскостям разъемов должны удовлетворять все блоки, съемные агрегаты, узлы и детали согласно ведомости комплектации (ВК), ведомости одиночного комплекта (ВОК) и ЗИП. Проверку взаимозаменяемости разрешается производить макетами, учитывающими предельные отклонения сопрягаемых деталей. При сборке и замене указанных изделий, блоков, агрегатов, узлов, деталей слесарные пригоночные работы не допускаются.

Примерку штатных приборов, аккумуляторных батарей следует производить при изготовлении первого изделия, а затем не реже одного раза в год по распоряжению главного инженера, согласованному с представителем заказчика.

Вместе с изделием завод-изготовитель поставляет следующую документацию:

- формуляр на изделие за подписью руководителя предприятия или главного инженера, начальника ОТК предприятия и представителя заказчика;
- формуляры или паспорта на приборы, агрегаты и другое бортовое оборудование, установленное на изделие и приложенное в соответствии с ВК;
- протокол испытаний системы измерений;
- протокол испытаний системы управления;
- перечень карточек разрешения, влияющих на эксплуатацию, утвержденных главным конструктором изделия и представителем заказчика;
- акты об устранении замечаний, допущенных при изготовлении и выявленных в процессе эксплуатации;
- перечень дополнений на изменение документов, действующих на данное изделие.

Приемосдаточная документация предприятия-изготовителя на детали, узлы и агрегаты, а также паспорт сборки изделия комплектуются в дело изделия и хранятся на заводе-изготовителе до особого указания. Для обеспечения эксплуатации изделия поставляются комплекты и одиночные комплекты (ОК). В процессе серийного производства комплекты ЗИП проверяются на предмет возможности обеспечения ими работ на изделии. Работу по проверке производят в соответствии с графиком, утвержденным главным инженером завода. При отправке приборов со склада они должны подвергаться автономным испытаниям, если пролежали на складе более 4 мес. Правилами приемки предусмотрен 100%-ный контроль деталей, сборок, узлов, агрегатов изделия и испытаний их ОТК и контроль предста-

вителем заказчика по специальному перечню, доведенному до главного инженера завода. На предприятии должен быть входной контроль поставляемых смежниками комплектующих, а также покупных материалов и полуфабрикатов, поступающих по кооперации.

Контроль массы и положения центра масс детали, сборочных единиц и покупных изделий производится в соответствии с ГОСТом. Масса покупных изделий и изделий, поступающих по кооперации от смежных предприятий, определяется взвешиванием перед установкой их на изделие и заносится в технологический паспорт сборки. Общие ТУ могут предусматривать и другие требования, направленные на полное обеспечение качественного изготовления изделий.

Примером частных ТУ являются и некоторые требования к монтажу пневмогидравлической системы (ПГС), бортовой кабельной сети (БКС) и приборов.

ТУ на ПГС изделия включают в себя: содержание; общие технические требования; специальные требования к деталям; специальные требования к монтажу двигателя; общие требования к испытаниям; методы испытаний; испытания на герметичность магистралей, смонтированных в процессе сборки изделия; испытания на герметичность магистралей после стыковки отсеков; испытания на герметичность магистралей после стыковки блоков изделия; приемка, хранение и укупорка.

Изготовление, испытания, приемка деталей и узлов, монтаж всех элементов ПГС в отсеках изделия, а также испытания в процессе и после сборки и монтажа производятся в соответствии с ТУ, чертежами, перечисленными в приложении к соответствующим ТУ, и общими ТУ на сборку, которые учитывают требования государственных и отраслевых стандартов.

Приведем несколько конкретных требований к монтажу ПГС изделия:

- сварку и сборку трубопроводов делать с учетом соответствующих ОСТов;
- перед подсоединением трубопроводов делать продувку их сжатым воздухом (предварительная $5 \cdot 10^5 \ldots 10^6$ Па, окончательная $5 \cdot 10^6$ Па);
- производить обезжиривание деталей и трубопроводов для среды "Оксид";
- перекос ниппельных соединений не должен быть более 3°.

Оговариваются случаи изготовления трубопроводов по месту. Регламентируется затяжка соединений ниппельных трубопроводов по граням (1,5...2 грани) после упора, фланцевые затягиваются по специальной методике. Оговариваются случаи перекосов и скручиваний компенсаторов. Не разрешается соприкосновение трубопроводов с острыми деталями и т.д. Требуется проверка

заправочных горловин на стыкуемость с эталонами заправочных средств, применяемых на стартовом комплексе. Двигатели перед монтажом на изделии должны проходить входной контроль.

ТУ на монтаж бортовой кабельной сети включают в себя предварительный и окончательный монтаж БКС на изделии.

При предварительном монтаже необходимо проверить и уточнить соответствие размещения кабелей сборочным чертежам, длины кабелей, необходимые для подключения к приборам, закрепления их на платах и кронштейнах, а также длины кабелей, идущих в смежные отсеки; возможность и места крепления наконечников для соединения с корпусом; взаимное размещение переходных контактов и держателей; места соприкосновения кабелей с острыми кромками и углами элементов конструкции и необходимость установки средств защиты; монтаж кабелей на крышках люков и съемных панелей.

Допускается в технически обоснованных случаях отработку монтажа БКС производить на макетных изделиях. На окончательном этапе монтажа не допускается производить переплетение кабелей; располагать кабели так, чтобы они соприкасались с подвижными частями конструкции изделия при их раскрытии и развертывании; подвергать кабели механическим воздействиям в процессе работы с изделием, скручивать кабели более чем на 180° при подходе к приборам. Не допускается также свободное перемещение кабелей в местах крепления. Внутренние радиусы изгибов кабелей должны быть не менее величин, указанных ниже.

Гибкие кабели диаметром D до 20 мм ..... 1,5 D
Гибкие кабели диаметром D более 20 мм ..... 1,5 D
Жесткие кабели диаметром D до 35 мм ..... 1,5 D
Жесткие кабели диаметром D более 20 мм ..... 1,5 D
Жгут кабелей диаметром D ..... 1,5 D
Силовой алюминиевый кабель диаметром D ..... 1,5 D

При креплении кабеля держателем из металла необходимо иметь в местах крепления обкладку из электроизоляционного материала. Шаг крепления кабелей держателями (L) следует выбирать в соответствии с рис.5.2. Для крепления кабеля диаметром до 16 мм шаг крепления берется не более 250 мм. При увеличении диаметра до 40 мм расстояние между точками закрепления кабеля может увеличиваться до 300...400 мм.

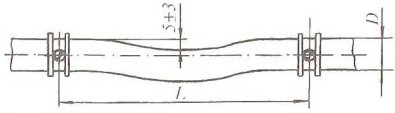


Рис5.2. Схема крепления кабеля держателями

Расстояние по кабелю от места входа в соединитель, подключаемый к прибору, до точки крепления кабеля должно быть в пределах 150...250 мм. При прокладке плоских кабелей их следует изгибать до диаметра не менее пятикратной суммарной толщины кабеля в плос-

кости, перпендикулярной расположению жил или расположенной под углом. При этом угол может быть любым. Для фиксации радиуса изгиба в месте изгиба следует устанавливать трубку или другой любой элемент, её заменяющий (элемент конструкции), что указывается в конструкторской документации (КД). Подключение кабелей производится после окончания монтажных работ на изделии. Подключение кабелей при наличии на изделии микроэлектронной аппаратуры, о чем должно быть указано в КД, необходимо производить с учетом требований соответствующего ОСТа. Перед подключением с помощью специальных заглушек с кабелей снимают статическое электричество.

Подключение соединителей к пиросредствам следует производить в соответствии с ОСТом и требованием КД. Перед сочленением соединителей после снятия крышек необходимо произвести внешний осмотр соединителей на предмет отсутствия посторонних частиц, промыть спиртом, просушить и т.д.

Основные требования к устанавливаемой аппаратуре и её монтажу заключаются в том, что данная аппаратура проходит входной контроль, отрабатывается и маркируется в случае установки в среду "Оксид". Монтаж проводится аттестованными исполнителями. До монтажа аппаратуры на изделии должны быть установлены все узлы и детали, предназначенные для крепления аппаратуры и проведены работы, связанные с образованием металлической стружки и пыли, а также вызывающие удары и вибрации. Все элементы крепления аппаратуры необходимо зафиксировать согласно КД по соответствующему ОСТу.

Аппаратура, устанавливаемая на амортизаторах, не должна касаться соседних элементов изделия при всех перемещениях, допускаемых амортизаторами. Приборы, установленные без амортизаторов, не должны касаться конструкции изделия и других приборов, для чего предусмотрен зазор не менее 3 мм. Датчики температуры, устанавливаемые в магистралях, следует ставить риской по оси трубопроводов с точностью ±3°. При этом установку необходимо обеспечивать набором прокладок. Стыки датчиков и их трубопроводов с емкостями, магистралями и между собой следует проверять на герметичность при пневмоиспытаниях систем. Маркировка аппаратуры и её штепсельных разъемов должна соответствовать схемной маркировке и располагаться в местах, удобных для обозрения в течение периода монтажа и эксплуатации изделия. Антенны, устанавливаемые на изделии вне завода-изготовителя, необходимо примерить на изделии, настроить и замаркировать. Все посадочные места на изделии, а также штепсельные разъемы БКС для аппаратуры, устанавливаемой вне завода, перед отправкой изделия должны быть проверены на стыкуемость штатной аппаратурой или макетами.

До заводских контрольных испытаний на изделии должна быть установлена вся аппаратура согласно плану испытаний изделия, подключены все штепсельные разъемы БКС в соответствии с электрическими схемами и проведена сверка номеров установленной аппаратуры с паспортами и формулярами, приложенными к формуляру изделия.

5.4. Содержание работ цикла общей сборки ракеты-носителя

Длительность цикла сборки в значительной степени определяется надежностью поступающих на общую сборку агрегатов, поэтому они должны при агрегатной сборке пройти все необходимые испытания и контроль. Чем меньше погрешностей и отказов проявляется на общей сборке, тем короче цикл за счет уменьшения объема испытаний и числа замен отказавших элементов и агрегатов.

К основным работам, проводимым на этапе ОС РН, можно отнести: входной контроль; стыковочные работы; монтажные работы; контрольно-регулировочные работы; испытательные работы; такелажно-транспортировочные работы; технологические процессы заключительного этапа ОС и комплектации изделий.

Как отмечалось выше, объем и содержание работ по каждой группе технологий будет зависеть от конструкции и состава изделия.

Применительно к жидкостной РН основные технологические процессы приведены на рис.5.3.

По важности технологические процессы ОС делить не принято. Как подчеркнуто в технических условиях, каждое нарушение может привести к отказу, но некоторые операции выделены в число ответственных и делаются под особым контролем. Эти операции могут быть в любом технологическом процессе.

Входной контроль. Все агрегаты, узлы, детали,приборы, поступающие на общую сборку, проходят входной контроль по основным параметрам.

Программа входного контроля включает в себя визуальный контроль консервационной упаковки, внешний осмотр комплектующих, контроль размеров, форм, испытания и проверку необходимых параметров на специальных стендах. Для КА проводят сплошной входной контроль, иногда по расширенной программе. Входной контроль может проводиться как автономно, когда контролируется только данный агрегат, так и комплексно на стендах с заменой некоторых стыкуемых агрегатов и элементов эталонными или имитируемыми. На этих же стендах при необходимости проводится отработка и регулировка контролируемых агрегатов и систем. Правильно организованный входной контроль обеспечивает минимум отказов их в процессе ОС.

Рис.5.3. Основные технологические процессы ОС

Входной контроль приборов и других покупных изделий делается чаще вне цеха ОС, однако некоторые из них, такие как двигатели, проходят входной контроль непосредственно в цехе ОС. Входной контроль комплектующих элементов сводится, как правило, к контролю сопроводительной документации, состояния упаковки, комплектности и отсутствия механических повреждений, целостности цепей БКС, испытаниям на герметичность магистралей ПГС и т.д.

Стыковка отсеков и агрегатов. Стыковка и соединение отсеков и агрегатов при общей сборке производятся по конструктивно-технологическим разъемам. Наиболее распространены соединения с помощью болтов (шпилек), замковые или с помощью различных пиротехнических устройств (пироболты, пироножи, пирозамки и т.п.), предназначенные для разъединения агрегатов, блоков (сброса массы) по заданной команде в процессе полета РН на активном участке траектории.

Сварные и клепаные соединения при общей сборке применяются крайне редко во избежание различных деформаций вследствие внутренних напряжений или повреждений стыкуемых агрегатов или элементов их от нагрева или ударов. При сборке агрегатов между собой в зависимости от числа стыковочных болтов различают контурное и точечное соединения. При контурном соединении большое число болтов распределяется равномерно ко контуру

стыковки. При точечном по контуру стыковки устанавливаются в нескольких точках (2...6) болты, пироболты или замки различной конструкции. Тип соединения влияет на конструкцию корпуса агрегата. При точечном соединении желательно иметь жесткие стыковочные элементы и лонжеронного типа корпус. Болтовые стыки должны быть конструктивно оформлены таким образом, чтобы они обеспечивали легкий доступ при затяжке и позволяли осуществлять равномерную по контуру затяжку. Это особенно важно для соединений, которые могут неоднократно демонтироваться или собираться на стартовой позиции при раздельной транспортировке.

Кроме фланцево-болтовых и замковых соединений встречаются винтовые и телескопические. Их конструкция должна гарантировать отсутствие самопроизвольного отвинчивания или сдвига агрегатов между собой при эксплуатации. Применяются также подвижные соединения типа ухо-вилка, гребенка, шаровой шарнир и др. [36, 55]. Они должны быть сконструированы с учетом требований технологичности, а сборка их обычно предусматривает местную доработку. Для соединений предусматривается иногда возможность регулировки по месту.

Соединений с несколькими шаровыми разъемными узлами следует избегать в связи с трудностями их точной сборки.

Особый тип представляют разнообразные пироболтовые или замковые соединения, разделяемые в полете. Сущность большинства конструкций состоит в том, что в заданное время по команде происходит разрушение одной из деталей по предусмотренному сечению, чаще с помощью пиротехнических устройств. К точности изготовления этих элементов соединения и их монтажу предъявляются повышенные требования для обеспечения синхронности срабатывания нескольких таких соединений по отдельным разъемам.

На рис.5.4.-5.8. представлены некоторые типы соединений, применяемых при сборке ракеты-носителя "Молния".

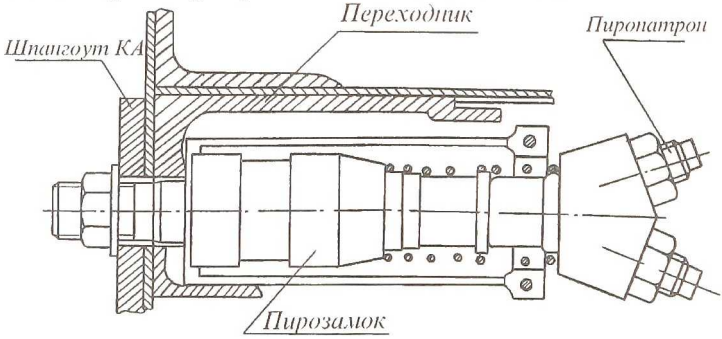


Рис.5.4. Стык переходника с космическим аппаратом

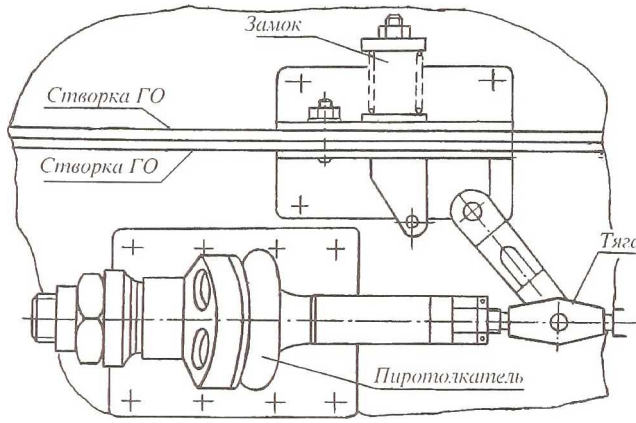


Рис.5.5. Стык створок головного обтекателя

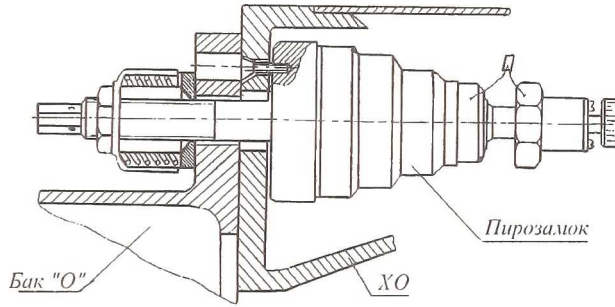


Рис.5.6. Стык бака "О" и хвостового отсека блока И

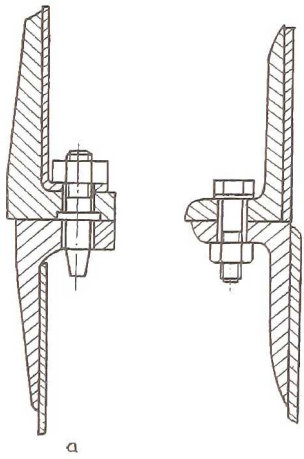


Рис.5.7. Межотсечные стыки:
а - баков "О" и "Г"; б - бака "О" и приборного отсека

Обеспечение точности стыковки. Для стыковки отсеков и блоков необходимо выставить их в требуемое положение, что чаще всего осуществляется специальными регулируемыми в трех направлениях тележками-подставками или осуществляется с помощью специальных траверс, подвешенных на крюк мостового крана. Обеспечение соосности и стыкуемости отсеков осуществляется взаимной отстыковкой оснастки, по которой изготавливаются стыкуемые отсеки (шпангоуты). Возможно базирование по ложементам стыковочного стенда, в этом случае точность положения отсеков определяется точностью установки

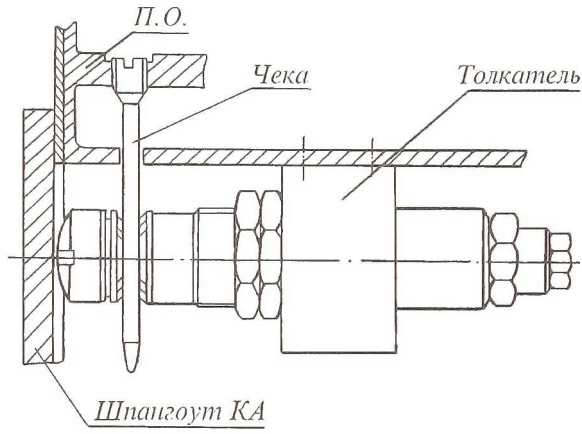


Рис.5.8. Стык космического аппарата с приборным отсеком

ложементов стыковочного стенда. При стыковке взаимозаменяемых агрегатов установка их в требуемое положение производится по привалочным поверхностям до совпадения отверстий стыковых болтов (ОСБ). Процесс соединения сводится к установке болтов и затяжке гаек тарировочными ключами. Поэтому важной задачей является обеспечение взаимозаменяемости агрегатов по стыкам.

При контроле геометрических параметров диаметр ОСБ проверяют пробками, расстояния между отверстиями штангенциркулем. Проверка качества стыков предполагает контроль ступеньки и положения отсеков друг относительно друга. Ступеньку определяют непосредственным замером индикаторной головкой в нескольких точках по окружности стыка. Положение отсеков друг относительно друга проверяют нивелировкой.

Особенности монтажа пневмогидравлической системы. Следует подчеркнуть, что монтажные работы ПГС ведутся, чередуясь со стыковочными и испытательными работами. Это обусловлено тем, что, во-первых, в современных конструкциях ЛА силовые элементы конструкции (баки) являются ПГС. Во-вторых, приняв схему членения и схему сборки ЛА по отсекам, мы таким образом часть работ по монтажам ПГС, БКС и приборов выполняем до стыковки отсеков. Такой характер ОС приводит к необходимости промежуточных испытаний (пневмо- и электроиспытания) с целью выявления возможных привнесенных дефектов в процессе монтажа и сборки на более раннем этапе.

В целом порядок ОС, обусловленный техническими условиями и директивной технологией, поддерживается, как правило, порядком выполнения технологических операций по паспорту ОС изделия (блока). При этом неукоснительно соблюдается порядок работ. Сначала выполняются механические работы, связанные со

сверлением, ударами и т.д., если они неизбежны. Затем производится монтаж крепежа, установка агрегатов и трубопроводов.

Монтаж системы ПГС сводится к установке на баки, другие отсеки агрегатов элементов автоматики (клапанов, электропневмоклапанов и др.), установке крепежных элементов (скоб, хомутов, держателей и т.п.), прокладке трубопроводов и соединению всех этих элементов между собой. Таким образом, основные задачи монтажа сводятся к правильной установке элементов ПГС, их надежному креплению и обеспечению во время соединения герметичности, работоспособности систем. Так как на каждом изделии в процессе монтажа приходится соединять сотни элементов ПГС, а стыки конструктивно разнообразны, то на практике технологии выполнения резьбовых соединений объединяются в типовые технологические процессы (ТТП).

Для РН "Молния" можно выделить следующие ТПП.

1. Резьбовое соединение трубопроводов со сферическим наконечником и штуцером.
2. Резьбовое соединение трубопроводов со сферическим наконечником и штуцером с прокладкой и опорным кольцом.
3. Резьбовое соединение трубопроводов с цилиндрическим наконечником, штуцером и прокладкой.
4. Резьбовое соединение трубопроводов с компенсатором.
5. Фланцевое соединение с накидным кольцом болтами.
6. Фланцевое соединение с помощью болтов.

При монтаже элементов ПГС производят установку и крепление арматуры по деталям каркаса, баков, по сборочным отверстиям на них. При этом должна обеспечиваться достаточно высокая их точность по длине и направлению рабочей части арматуры. Так, допуск на установку штуцера по длине должен быть в пределах ±1 мм. Проверку положения штуцеров по направлению проводят с помощью специальных шаблонов или другой оснастки, базирующейся на баках отсека.

Высокая точность требуется также при установке арматуры, устанавливаемой с помощью специальных фиксаторов. При установке хомутов и колодок крепления трубопроводов с отклонениями от чертежей или заданного эталонного монтажа возникают монтажные напряжения в соединениях трубопроводов, вследствие чего снижается их надежность. Трубопроводы изготавливаются по эталонам и передаются на сборку обезжиренными и расконсервированными, с заглушенными и опломбированными штуцерами. Перед установкой на борт снимаются заглушки, трубопроводы продуваются и проверяются на чистоту. Во время прокладки и крепления трубопроводов следят за наличием зазоров с элементами конструкции во избежание потертостей при эксплуатации. Особенно тщательно надо следить за

радиусами изгибов трубопроводов, которые не должны быть меньше суммы трех диаметров труб R≥3d, а также за овальностью труб, которая должна быть меньше 3...4%. В местах изгиба трубопроводы следует крепить до и после изгиба. После прокладки трубопровода крепится один его конец, а второй проверяется на остаточные упругие деформации, которые ограничиваются требованиями ТУ.

При стыковке трубопроводов со штуцерами баков, арматуры, между собой несоосность их должна быть не более 1 мм. Ниппельные соединения должны быть без перекосов. В случаях перекоса до 3° допускается применять в конструкциях стыка выравнивающие кольца.

Особое внимание при монтаже ПГС уделяется надежности соединений как фланцевых, так и ниппельных. Сила затяжки отрабатывается на каждый стык. Регламентация осуществляется или применением моментных ключей, или числом граней затяжки.

Особенности монтажа приборов. Особенностью монтажа приборов является то, что часть приборов системы управления требует определенной ориентации при их транспортировке и работе, а также высокой точности их установки на борт ракеты относительно базовых осей. В первую очередь это относится к гироскопическим приборам, их чувствительным элементам. Поэтому при общей сборке особое внимание уделяется выставке мест креплений приборов, таких как гироплаты, гироплатформы и т.д. При этом для сохранения ориентации при транспортировке для некоторых приборов делаются специальные технологические кронштейны, позволяющие устанавливать приборы в вертикальное положение при горизонтальной транспортировке блоков или транспортировать эти приборы отдельно. Следует также отметить, что для контроля посадочных мест и для балансировки блоков используют специальные "габаритно-весовые" макеты приборов, а контрольные проверки производят штатными приборами один раз в год.

Особенности монтажа бортовой кабельной сети. При монтаже кабелей особое внимание уделяется их сохранности. Поэтому их прокладка осуществляется после слесарных работ. Возможные повреждения стараются выявить на более ранней стадии, для чего вводится прозвонка БКС до подключения к приборам, что одновременно дает возможность предотвратить выход из строя самих приборов.

Стыковка штепсельного разъема (ШР) требует к себе также особого внимания и контроля из-за многообразия типов разъемов, каждый из которых имеет свою технологию соединения.

Прочие монтажи. Среди них особое место занимают монтажи таких элементов конструкции, которые обеспечивают расстыковку элементов РН в процессе сброса масс на активном участке полета. Это различные виды замков (пиро- и пневмопружинные и т.д.), пово-

ротные узлы и другие системы, такие как система пожаротушения, пороховые ракетные двигатели (РД) увода, разворота и другие. Особенность их монтажа в том, что они в процессе ОС должны проверяться на работоспособность, т.е. предусматриваются имитации их работы. Например, сброс головного обтекателя, отстыковка бокового блока и т.д.

Особенности испытания систем. Системы испытаний и контроля занимают большое место в производстве и особенно в общей сборке ЛА. Общей их целью является обеспечение высокой заданной надежности, способности ЛА выполнить в полной мере заданные функции в течение определенного времени как в наземных (при транспортировке, подготовке, запуске), так и в условиях полета.

Контроль и испытания проводятся на всех этапах изготовления ЛА, начиная с приемки поставок, кончая испытаниями на стартовом комплексе перед запуском. Однако неограниченное увеличение контрольно-испытательных работ не обеспечивает роста надежности. Во-первых, контроль и испытания, кроме увеличения стоимости ЛА, сами могут вносить дополнительные дефекты и повреждения в конструкцию и системы. Во-вторых, при контроле и испытаниях вырабатывается ресурс работы отдельных элементов, узлов, аппаратуры, агрегатов, работоспособность которых ограничена. Это заставляет иногда производить некоторые виды испытаний на моделях и макетах (опытных, экспериментальных), неподвергая этим испытаниям летные образцы ЛА, например, испытания на отстрел частей ЛА, испытания на влагозащищенность дождевание и т.д. Вследствие этого вся совокупность контроля и испытаний ЛА требует систематизации, определения оптимального сочетания видов испытаний, объемов их, числа и места в ходе технологического процесса сборки и после неё, исходя из необходимости. Часто их программа корректируется по результатам отказов в процессе эксплуатации.

Задача оптимизации стратегии испытаний в настоящее время решается индивидуально для каждого типа ЛА, хотя выработаны общие законы и принципы. Система испытаний строится на принципах, учитывающих специфику конструкции ЛА, условий эксплуатации, производства и т.д.

Отработанный объем и методика испытаний становятся неотъемлемой частью технологии изготовления (ОС) ЛА.

Возвращаясь к примеру ОС РН "Молния", следует выделить следующие виды испытаний.

1. Испытания на работоспособность. Например, возможность раскрытия головного обтекателя и сброса его створок. Возможность отстыковки боковых блоков. Сборка бортовых колодок и т.д.
2. Испытания на герметичность ПГС. Вначале проводятся испытания после монтажа на баках и отсеках. Затем после стыковки отсеков

и, наконец, после окончания монтажных работ. Способы контроля и чувствительность применяемого метода проверки задаются КД. Для контроля ПГС РН "Молния" часто применяют метод избыточного давления с нанесением мыльной эмульсии на стыки систем, контроль по спаду давления, масс-спектрометрический метод с использованием гелиево-воздушной смеси.

3. Электроиспытания. При электроиспытаниях в процессе монтажных работ проверяется сплошность цепей БКС, сопротивление изоляции и проверка на срабатывание некоторых элементов.

Основные же работы по электроиспытаниям сосредоточены на специально оборудованной КИС, выделенной отдельным участком. Здесь проводятся автономные испытания, когда каждая система проверяется отдельно на соответствие заданным параметрам по специальной программе, и комплексные испытания с записью на пленку правильности и своевременности функционирования всех элементов систем ЛА, т.е. проверяется имитация работы их в полете.

После завершения испытаний, анализа результатов записи и визуального наблюдения делается заключение о готовности изделия к эксплуатации.

Заключительный этап ОС. После завершения испытаний на КИС - просмотра и оценки пленок результатов испытаний, выдачи заключения на изделие (ЛА) проводятся заключительные операции на каждом блоке ЛА.

Производится отключение систем изделия от наземной испытательной сети. В системах ПГС устанавливается определенное давление. Системы консервируются, т.е. внутренние полости их или с помощью избыточного давления разобщаются с атмосферой, или связь их с атмосферой происходит через специальные бачки с селикогелем (осушителем-влагопоглотителем). Снимаются с изделия все элементы, предназначенные для отдельной транспортировки. Производится визуальный общий технический осмотр отсеков, закрываются все эксплуатационные люки крышками и пломбируются. Блоки передаются на специальный участок, где производится оклейка для предотвраще-ния проникновения влаги в отсеки и проводится косметическая подкраска блоков для придания однотонности покраске и закраске возможных повреждений лакокрасочных покрытий в процессе ОС. Каждый блок маркируется согласно схемам маркировки блоков, люков и изделия в целом. Каждый блок проходит также взвешивание с определением продольной центровки. Готовое изделие поблочно чехлится в герметичную упаковку, которая проверяется на герметичность по спаду давления.

Комплектующие приборы, съемные принадлежности, колодки, запасные части, расходные материалы перед отправкой консервируются и упаковываются в специальные ящики и транспортируются

вместе с изделием. С изделием отправляются оформленные в установленном порядке сопроводительные документы (перечень их был дан в ТУ на поставку изделия).

Так как в цехе ОС осуществляются технологические процессы, связанные с опасными для жизни работами, вопросам техники безопасности уделяется исключительно большое внимание. Она включает в себя комплекс специальных требований по всему циклу работ. При этом особое внимание уделяется: работам на высоте, так как стремянки, стапели, стенды достигают высоты десяти и более метров; транспортно-такелажным работам, что необходимо не только для безопасности людей, но и для безопасной, безаварийной транспортировки самих изделий; работам с высоким давлением, так как испытательные давления составляют 10^7 Па и более, а емкости, заполняемые низким давлением, имеют такие объемы, что в случае их разрушения представляют собой огромную разрушительную силу; работам с электрооборудованием под высоким напряжением, хотя высокое напряжение стремятся всячески исключить из технологического процесса; работам с горюче-смазочными, легковоспламеняющимися материалами и отравляющими (ядовитыми) веществами.

Требования по технике безопасности указываются в каждом технологическом процессе, а к работе допускаются только ежегодно аттестуемые по знанию правил техники безопасности и выполняемых работ исполнители.

6. ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ И ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В этой главе основное внимание будет уделено защите ЛА типа РН и КА, которые в условиях эксплуатации подвергаются наибольшему нагреву, который может быть аэродинамическим и лучистым от работы двигателей, от работы ряда бортовых систем и т.д. [36].

Прирост температуры нагрева поверхности ЛА особенно велик при входе в плотные слои атмосферы ($H \leq 80$ км) при сверхзвуковом и дозвуковом полетах вследствие возникновения общих и местных скачков уплотнения. В скачках уплотнения воздух тормозится, часть кинетической энергии потока переходит во внутреннюю (тепловую) энергию воздуха, при этом вся обтекаемая потоком поверхность ЛА нагревается. Наиболее сильному нагреву подвергается поверхность ЛА в точках полного торможения потока.

Вследствие нагрева нарушается оптимальный тепловой режим работы конструкции аппарата и изменяется оптимальная температура внутри него. Влияние нагрева на прочность несущей конструкции, механические свойства и ползучесть материала конструкции, жесткость и устойчивость аппарата и тепловой режим внутри конструкции в большинстве случаев оказывается столь большим, что требует принятия специальных мер по уменьшению этого вредного термического воздействия на аппарат. Наряду с конструктивными мерами, направленными на уменьшение интенсивности аэродинамического нагрева за счет ламинаризации пограничного слоя или изменения аэродинамических обводов и повышения качества поверхности обшивок, а также на уменьшение температурных напряжений и деформаций в элементах конструкции, в ЛА находят применение специальные теплозащитные и теплоизоляционные покрытия, которые во многих случаях отличаются сложной конструкцией и структурой и специфической технологией.

Современные теплоизоляционные покрытия не могут сопротивляться высоким внешним температурам в течение длительного времени из-за низкой жаропрочности, поэтому в случае длительного воздействия больших тепловых потоков (например, от аэродинамического нагрева или сильного и длительного лучевого потока) на корпус наносятся дополнительно теплозащитные покрытия, которые обычно расходуются (сублимируют, аблируют) или содержат расходуемые компоненты. Задачей их является уменьшение температуры, весьма высокой (до 5000 К и выше) на поверхности покрытия, до допустимой на поверхности несущей обшивки аппарата, зависящей от

материала защищаемого объекта. Теплозащитные покрытия в значительной мере выполняют и функции теплоизоляционных, поэтому могут изредка применяться и без них. В ряде случаев теплозащитные покрытия выполняют и противометеоритные функции. Теплозащитные и теплоизоляционные покрытия образуют единую систему сохранения теплового режима аппарата вместе с системой терморегулирования аппарата, позволяя значительно уменьшить ее мощность и массу.

Теплозащита должна обеспечивать заданный тепловой режим для обеспечения комфортных условий деятельности экипажа, работы конструкции, бортовых систем и аппаратов и на нее приходится значительная доля массы ЛА.

6.1. Теплоизоляционные покрытия. Технологические процессы их нанесения

Теплоизоляционные покрытия (ТИП) корпусов ЛА, которые могут быть внутренними и внешними, обычно выполняют свои функции за счет низкой теплопроводности и высокой теплоемкости, не разрушаясь и не расходуясь, а поглощая и сохраняя в себе поступающую тепловую энергию. Внутренние ТИП больше предназначены для сохранения заданного теплового режима внутри конструкции, а внешние для уменьшения теплового потока к обшивке и силовым элементам корпуса [36]. Теплоизоляционные покрытия относятся к пассивным системам терморегулирования. Их эксплуатационные свойства и эффективность теплоизоляции в соответствии с механизмом действия, связанным с поглощением и накапливанием воздействующей на аппарат теплоты, определяются рядом показателей:

- удельная масса отношение массы единицы объема материала, высушенного при температуре 110°С, к его объему в плотном состоянии без объема пор;
- объемная масса отношение массы единицы объема материала, высушенного при температуре 110°С, к его объему с учетом пор; чем он больше, тем теплоизоляционные свойства материала хуже; он колеблется в значительных пределах: 5...10 кг/м^3 алюминиевая гофрированная фольга, 1400 кг/м^3- асбестовый картон;
- пористость обычно находится в пределах 60...95%, она определяет прочность, газонепроницаемость, коэффициент теплопроводности, объемную массу и, в конечном счете, теплоизоляционные свойства; чем меньше поры и чем больше закрытых пор, тем меньше конвекция воздуха и выше теплоизоляционные свойства;
- теплопроводность, которая с учетом трех путей передачи теплоты - теплопроводности, конвекции, лучеиспускания харак-

теризуется эквивалентным коэффициентом теплопроводности материала;

- температуропроводность и удельная теплоемкость, которая для неорганических материалов равна 0,6...1,0 кДж/(кг·К), а органических 1,2...1,6 кДж/(кг·К).

Часто учитывают и дополнительные характеристики: механическую прочность, пластичность, расширение и усадку, огнеупорность и огнестойкость, коррозионную и эрозионную стойкость, гигроскопичность и т.д.

В общем случае материалы для ТИП должны удовлетворять достаточно высоким требованиям: минимальная объемная масса; высокая теплоемкость (до 1,6 кДж/(кг·К); коэффициент теплопроводности для наружных ТИП 0,1...0,16 Вт/(м·К)), для внутренних ТИП около 0,085 Вт/(м·К) (коэффициент теплопроводности неподвижного воздуха равен 0,023 Вт/(м·К); минимальные значения усадки и изменений объема в диапазоне температур эксплуатации; требуемая прочность и жаропрочность, огнеупорность; низкие гигроскопичность, воздухо- и газонепроницаемость; требуемая отражательная способность; хорошая технологичность; экономичность; нетоксичность при изготовлении; стабильность свойств в диапазоне температур и времени эксплуатации и т.д.

Теплоизоляционные материалы делятся на неорганические (асботкани, стеклоткани, стекловата, пеностекло, пенокорунды, металлическая фольга и др.) и органические (войлок, полихлорвинил, пенопласты на основе полиуретана, полистирола, полиимида, поропласты, поролон и др.). Конструктивно-технологическая классификация ТИП основана на виде применяемых для них материалов.

ТИП на основе эластично-волокнистых материалов с органическими (полимерными) и неорганическими (кварцевыми, асбестовыми, стеклянными) волокнами применяются для внутренней и внешней теплоизоляции при отсутствии механических воздействий на покрытие, так как их предел прочности меньше 10^2 кПа. В зависимости от жаростойкости волокон такие покрытия работают в пределах от 50 до 1500°С. Данный вид ТИП часто требует теплозащитных покрытий и располагается между теплозащитным покрытием (ТЗП) и поверхностью конструкции.

ТИП на основе жестких волокнистых материалов применяют для внешней теплоизоляции аппарата, подвергающегося механическому воздействию метеоритов или аэродинамическому воздействию: предел прочности их составляет $(5...25)\times10^2$ кПа. В зависимости от связующего (фенолформальдегидная, кремний-органическая, полиэфирная и т.д. смолы) покрытия данного вида работают при 100 1500°С. Разновидностью покрытий являются пеноматериалы (пено-

стекло, пенопласты и т.д.), обладающие хорошими массовыми и изоляционными свойствами. Широкое применение их во внешних ТИП сдерживается недостаточной термостойкостью применяемых клеев.

Экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ), применяемая как внешняя теплоизоляция космических аппаратов или отдельных блоков и отсеков, состоит из ряда тонких листов экранов с высокой отражательной способностью, между которыми находятся прокладки из материалов с низкой теплопроводностью. В полете между экранами создается вакуум. В качестве экранов используются или органические (лавсановые, полиимидные и др.) пленки с односторонним или двусторонним отражающим покрытием (алюминий, золото и т.д.), или металлическая фольга (алюминий, никель, титан и др.). В качестве низкотеплопроводных прокладок используют стеклоткани, вуали, различные нитяные плетения, удерживающие воздух между экранами. ЭВТИ чаще всего изготавливают в виде матов пакетов из ряда слоев экранов и прокладок, обшитых тканями. В зависимости от материалов экранов ЭВТИ могут работать в пределах температур от -200 до 1000°С (никелевые экраны). ЭВТИ находит достаточно широкое применение в КА.

Комбинированная теплоизоляция находит все большее применение в КА. К комбинированным покрытиям относят сочетание различных видов тепловой изоляции, иногда сочетание ТИП с ТЗП. Конструктивное решение комбинированных покрытий может быть различно, поэтому разновидностей комбинированных ТИП много. Одной из распространенных разновидностей комбинированных покрытий являются сотовые конструкции в сочетании с другими разновидностями тепловой изоляции. В зависимости от конструкции и применяемых материалов комбинированные ТИП работают в более широком диапазоне температур, чем отдельные виды ТИП, и сочетают в себе различные свойства и функции. Отметим, что в большинстве КА применяются ТИП различного вида на различных участках в зависимости от условий эксплуатации, имеющихся тепловых потоков и требований к сохранению теплового режима работы конструкции КА. Конкретные технологические процессы изготовления ТИП зависят от вида и конструкции ТИП, применяемых материалов и требований к ним. Рассмотрим несколько примеров. Основными этапами изготовления наиболее распространенного вида ТИП экранно-вакуумной теплоизоляции - являются следующие:

1) контроль исходных материалов, к которым относятся экраны и прокладки, а также различные ткани для обшивки матов, капроновые нити и т.д. Кроме геометрических размеров и целостности их может проверяться степень черноты и коэффициент отражения поверхности. Чаще всего экранами служат полимерные пленки, металлизированные с одной или с двух сторон, иногда

алюминиевая или никелевая фольга толщиной 0,01...0,2 мм. В качестве прокладок обычно применяют различные стекловуали, которые обеспечивают кроме теплоизоляции гарантированный зазор между экранами;

2) формование экрана на вакуум-формовочной машине с предварительно нагретой формовочной плитой до температуры около 300°С для пленки и около 350°С для фольги. Процесс формования металлизированной пленки производится при температуре около 140°С в вакууме около 650×10^2 Па в течение 30 с, фольги при температуре 170°С в вакууме 130×10^2 Па в течение 1 мин. После формования экраны охлаждаются сжатым газом до 40...50°С. В результате формования на поверхности пленки или фольги образуются рифления для воздуха;
3) контроль качества формования по геометрическим параметрам, а также степени черноты и коэффициента отражения поверхности в каждом формируемом рифленом рулоне;
4) сборка необходимого числа дублированных (экран с вуалевой прокладкой) слоев. Экраны укладываются в пакеты (маты) металлизированной стороной наружу покрытия. Сборка производится на специальных рабочих столах. Укладка первого и последнего слоев экрана производится так, чтобы стекловуалевая прокладка располагалась внутри мата. Число экранов обычно в пределах 20...50. При большом числе слоев ЭВТИ может состоять из нескольких матов;
5) выкройка пакета по шаблону, изготавливаемому из картона или фанеры;
6) сварка ультразвуком слоев для матов больших размеров;
7) перфорирование производится для улучшения вакуумирования ЭВТИ;
8) сметывание мата по периметру. Для защиты ЭВТИ от механических повреждений с внутренней стороны её обшивают перкалем или стеклотканью, с наружной стороны специальной тканью с заданными радиационными характеристиками;
9) контроль наличия перфорации, целостности экранов, геометрических размеров, смещения отверстий перфорации и сварных швов одного слоя относительно другого и т.д.;
10) окончательное сшивание матов. Обшивка матов по кромкам производится лентой и капроновыми нитками одного цвета с тканью без утяжки по толщине мата.

Технологический процесс изготовления внутренней теплоизоляции на основе поропласта и облицовочной ткани панельного металлического корпуса КА включает в себя следующие операции:

1) входной контроль корпуса визуально на отсутствие механических повреждений. Контроль поропласта на соответствие ТУ удельной массы и толщины, а также вязкости клея;
2) нанесение кистью клея (например, клея 88) на одну поверхность листового поропласта равномерным слоем и сушка в течение 24 ч при температуре 20°С;
3) вырезка заготовок поропласта по шаблонам, снятым с изделия;
4) нанесение клея на облицовочную ткань с внутренней стороны и сушка в течение 24 ч;
5) очистка и обезжиривание внутренней поверхности металлического корпуса;
6) нанесение тонкого равномерного слоя клея на очищенную внутреннюю поверхность корпуса и выдержка в течение 1 ч;
7) подгонка заготовок поропласта по местам установки в корпусе по стрингерам, лючкам и т.д.;
8) нанесение второго слоя клея на поверхность корпуса, сушка в течение 3...5 мин и приклеивание заготовки поропласта. Нанесение клея и приклеивание поропласта производят участками;
9) сушка в течение 16 ч;
10) контроль качества приклейки поропласта визуально и на отрыв;
11) нанесение клея на приклеенный поропласт и сушка в течение 8 ч;
12) нанесение второго тонкого слоя клея на облицовочную ткань и приклейка ткани на поропласт. Приклейка ткани также ведется участками;
13) сушка приклеенной ткани в течение 24 ч;
14) контроль нанесенной внутренней теплоизоляции визуальным осмотром на отсутствие грязи, следов клея, отслоений, механических повреждений и т.д.

В зависимости от конструкции ТИП технология их изготовления может быть сложнее и содержать больше этапов и операций.

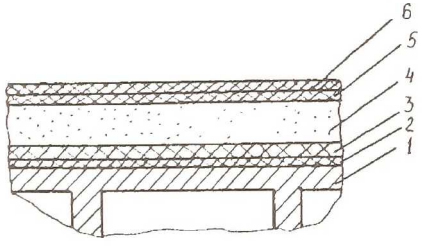


Рис.6.1. Типовая конструкция теплоизоляционного пенополиуретанового покрытия:
1 - конструкция покрываемого изделия (алюминиевый сплав); 2 грунт; 3 клей Криосил; 4 - пенополиуретан; 5 - клей ВИЛАД; 6 - лакокрасочные покрытия

В качестве примера рассмотрим технологический процесс нанесения пенополиуретановых покрытий [6].

Типовая структура теплоизоляционного материала на примере применения пенополиуретана ППУ-Рипор-2Н, состоящего из грунтовки ЭП-0214 и клея Криосил-Р, а также с внешним слоем покрытия клеем ВИЛАД-5К представлена на рис.6.1.

Пенополиуретан (ППУ) наиболее распространенный и технологичный в получении вид пенопласта. В этих материалах сочетаются свойственные полимерам прочность, эластичность, химическая стойкость и другие свойства с малой плотностью, высокими тепло-, электро- и звукоизоляционными характеристиками, привносимыми газовыми включениями, являющимися основным элементом морфологической структуры газонаполненных материалов. В зависимости от того, является ли основная доля газовых ячеек изолированными или сообщающимися, газонаполненные пенопласты принято делить на закрыто- и открытоячеистые. Первые находят широкое применение в качестве легких заполнителей силовых конструкций, тепло- и звукоизоляторов, плавучих средств и т.п., вторые же являются прекрасными материалами для фильтрации и сепарации жидкостей и газов. Неменьший интерес представляют газонаполненные полимеры смешанной структуры, в которых варьированием соотношения закрытых пор и открытых пор достигается необходимое сочетание прочности, изоляционных свойств и проницаемости.

Теплоизоляционное покрытие ППУ Рипор-2Н предназначено для защиты поверхностей, работающих при температурах от -253°С до +300°С. Срок хранения 15 лет, в том числе 1 год полевого хранения. Пенопласт самозатухающий. Горение прекращается не более чем через 7 с после удаления источника огня. ППУ Рипор-2Н имеет ячеистую структуру от светло-серого до светло-желтого цвета.

Физико-механические свойства.

1. Кажущаяся плотность, г/см^3 ..... 0,035...0,060
2. Предел прочности при сжатии при 10% деформации, МПа 15
3. Объемное содержание закрытых пор, % ..... не менее 80
4. Водопоглощение за 24 ч, кг/м^2 ..... не менее 0,1
5. Предел прочности при растяжении, МПа, при +20°С .. не менее 30
   при -253°С 30
6. Относительное удлинение при растяжении, % ..... не менее 2
7. Коэффициент теплопроводности, Вт/(мК) ..... не менее 0,17
8. Коэффициент линейного термического расширения, град$^{-1}$, в
   диапазоне от -253°С до +20°С ..... не более $40 \cdot 10^{-6}$
9. Теплостойкость, °С ..... не менее 130.

Компоненты, входящие в состав ППУ Рипор-2Н, должны соответствовать требованиям ТУ на них. Входной контроль проводится по показателям влажности, кислотности, pH и содержания ОН групп для Рианола и Лапромола; кислотности для КЭП-2; влажности и содержания основного вещества для диметилэтаноламина; вязкости, содержания изоцианатных групп для полизоцианата (ПИЦ); содержания олова и каталитической активности для катализатора 230-15; кислотности и влажности для трихлорэтилфосфата и хладона-113.

Компоненты должны храниться в маркированной посуде. Срок и условия хранения должны соответствовать техническим требованиям хранения каждого компонента. По истечении гарантийного срока хранения компоненты должны быть проверены на соответствие ТУ.

Напыляемая композиция должна состоять из смесей А и Б, имеющих следующий состав в массовых частях (м.ч.).

Смесь А

Олигоэфир Рианол 60
Лапрол-805У 30
Лапромол 294 10
Трихлорэтилфосфат 45
Поверхностно-активное вещество КЭП-2 5
Катализатор 230-15 0,4
Диметилэтаноламин (ДМЭА) ..... 2,0÷6,0

Смесь Б

Полиизоцианат марки Б ..... по расчету
Хладон-113 ..... от 17 до 20% от общего количества компонентов А и Б

Расчетное количество полиизоцианата определяется по формуле

$$Q = 2{,}72\frac{60A_1 + 30A_2 + 10A_3 + kA_4}{\%NCO} + 5{,}14\frac{60B_1 + 30B_2 + 10B_3 + kB_4}{\%NCO}, \quad (6.1.)$$

где Q количество ПИЦ, приходящееся на общее требуемое количество смеси A с катализатором, м.ч.; k - количество ДМЭА в м.ч. (2...6); $\%NCO$ содержание изоцианатных групп в ПИЦ в %; A_1, A_2, A_3, A_4 содержание гидроксильных групп в Рианоле, Лапроле, Лапроноле и ДМЭА, %; B_1, B_2, B_3, B_4 содержание воды в Рианоле, Лапроле, Лапроноле и ДМЭА, %.

Расчетное количество хладона для смеси Б на Q м.ч. ПИЦ

$$x = k\,(A + Q). \quad (6.2.)$$

Соотношение смесей компонентов рассчитывается по формуле и может иметь значение ≈1,8:2,1 в зависимости от фактических показателей содержания ОН групп, H_2O, NCO.

При приготовлении смесей компоненты должны иметь температуру 15...35°С. Перед и после приготовления смеси провести технологическую пробу свободным вспениванием для оценки качества сырья и рабочих свойств композиции. Во время вспенивания фиксировать время гелеобразования, время старта. Технологическую пробу считают удовлетворительной, если композиция вспенивается, пенопласт имеет цвет от светло-желтого до светло-серого и мелкоячеистую однородную структуру, отсутствуют трещины.

Приготовление смесей А и Б Рипор-2Н производится на установке по приготовлению смесей фирмы "Секмер" (Франция).

Для приготовления смеси А в термостатируемую при температуре 20...25°С емкость загружают последовательно отвешенные компоненты. Компоненты перемешивают в емкости с закрытой крышкой. Срок хранения смеси А с катализатором 10 ч, а без катализатора 230 15 ч и диметил этаноламина - 72 ч.

Смесь Б приготавливается в емкости путем перемешивания полиизоцианата и хладон -113 при температуре 20...25°С. Срок хранения приготовленной смеси Б один месяц при температуре 15...25°С в герметично закрытой таре. Контроль качества смесей А и Б проводится после приготовления через 24 часа.

Для напыления используются машины, работающие по двухкомпонентной схеме на смесях с вязкостью до 1000 Па·с, например, типа "Каннон", ПУН, П-481 и др.

При нанесении покрытия также применяются следующие компоненты.

1. Грунтовка ЭП-0214.

2. Эпоксидный клей "Криосил", представляющий собой высоковязкий двухкомпонентный материал с наполнителем нитридом бора. Жизнеспособность клея при температуре 15...35°С не менее 2 ч.

3. Клей полиуретановый ВИЛАД-5К с жизнестойкостью 14...16 ч при температуре 15...35°С.

Для получения полиуретанов используется автоматическая линия, изготовленная на базе комплекса по приготовлению смесей "Секмер" (Франция). На линии можно приготовить два вида ППУ: Рипор-2Н и ППУ-306Н. Емкости линии позволяют готовить до 50 кг ППУ и автоматически подавать его на участок. Схема линии показана на рис.6.2.

Линия включает в себя: оборудование по транспортировке компонентов, линии трубопроводов, насосы; оборудование по хранению отдельных компонентов; оборудование по приготовлению смесей-реакторов; оборудование по обеспечению необходимых условий труда, вентиляционные системы, освещение и т.д. Линия имеет пульт управления с компьютерной техникой, обеспечивающей автоматическое проведение технологических операций по смешиванию, дозировке и транспортировке смесей и компонентов.

Общий вид автоматизированной линии показан на рис.6.3.

В состав линии "Секмер" входят: емкость для хранения исходных компонентов; емкость для хранения готовых смесей; дозирующее устройство; смесительные устройства; насосы, приводы; расходные баки; системы измерения давления, температуры и расхода компонентов; система регулирования температуры компонентов; система

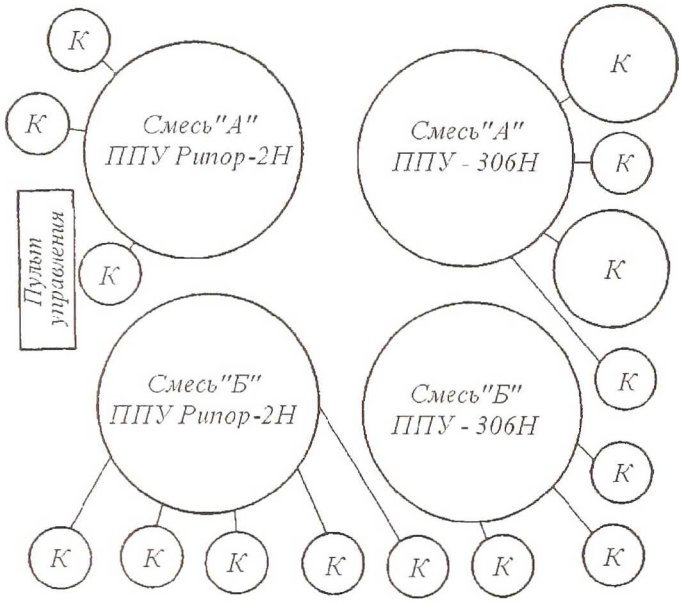


Рис.6.2. Схема линии Секмер приготовления смесей

автоматизированного заполнения; система промывки установки; шланги, трубопроводы.

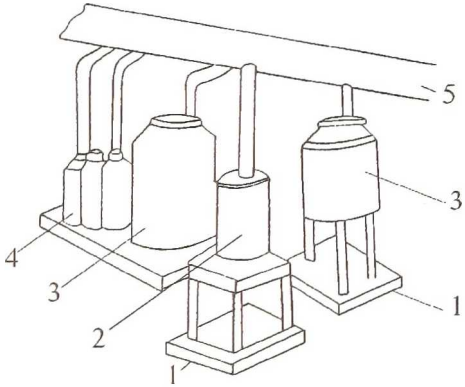


Рис.6.3. Общий вид установки "Секмер": 1 весы; 2 емкость с готовыми компонентами пенополиуретана; 3 емкость для хранения готовых смесей; 4 - емкость для хранения компонентов смесей; 5 азотная система

Для нанесения клея Криосил и других двухкомпонентных высоковязких материалов методом пневматического распыления с подогревом используется установка "Бинкс". Применение установки позволяет механизировать процесс нанесения покрытий, повысить производительность труда, улучшить качество покрытий.

Работа установки. Полиэфирная композиция нагревается до рабочей температуры и подается насосами, регулирующими подачу в заранее установленных пропорциях по объему. До открытия клапанов напылительного пистолета компоненты перекачиваются обратно в соответствующие резервуары. Затем жидкости в определенной пропорции подаются к смесителю.

Напылительный пистолет имеет два клапана с рычагами для пуска компонентов, воздушный клапан, пневмодвигатель, смеситель, напылительное сопло. Пневмомотор, работающий при 5000 мин$^{-1}$, соединен с внутренней обоймой роликового подшипника - смесителя компонентов. Соотношение между размерами внутренней обоймы и роликами подобрано так, что обеспечивает вращение роликов с частотой 2000 мин$^{-1}$. Жидкости проталкиваются через подшипник и при вращении подшипника смешиваются и подаются к напылительной головке. В подающем агрегате имеются контейнеры для каждой из рабочих смесей. Давление подачи у напылительного пистолета достигает 1,4 МПа, скорость подачи 4 кг/мин.

Резервуары не находятся под давлением, поэтому они могут наполняться без выключения оборудования. Имеется также резервуар с растворителем, который необходим для очистки напылительного пистолета и предотвращения затвердевания материала в трубопроводах и напылительном сопле.

Установка "Каннон" предназначена для напыления и заливки пенополиуретана. Изготовлена в Италии. Вспенивающая машина смонтирована на передвигаемой тележке и может транспортироваться одним человеком.

Напыления и заливка производятся по двухкомпонентной схеме. Компоненты А и Б размешиваются в специальных резервуарах. Дозировка двух компонентов осуществляется объемными шестеренчатыми насосами с низкой частотой вращения. Термостатическое обеспечение обоих компонентов осуществляется водотрубными теплообменниками с горячей и холодной водой.

Для распыления применяется смесительная головка (пистолет), которая подсоединяется с помощью шлангов длиной от 3 до 20 м с особым управлением.

Машина "Каннон" оснащена краном для отсечения рециркуляционной цепи, позволяя таким образом выполнить оптимальное термостатирование материала. Кроме того, машина оснащена незамерзающей емкостью для защиты цепи воды. Технические характеристики машины "Каннон" приведены ниже.

Стандартное напряжение, В 380
Частота трехфазного тока, Гц 50
Давление сжатого воздуха, Мпа 0,8
Мгновенная подача, л/мин 300
Расход двух компонентов, л/мин ..... 2÷6
Объем емкости для компонентов, л 70
Объем емкости для растворителя, л 10
Масса распылительного пистолета, кг 2

Для механизированного нанесения методом напыления лакокрасочных покрытий и пенополиуретанов на крупногабаритные сбо-

рки, установленные во вращающемся стенде, применяется универсальное сканирующее устройство. Оно представляет передвижную платформу, на которой размещены электропривод с рамным сканирующим устройством и цепной передачей, обеспечивает равномерное нанесение материалов, имеет плавную регулировку сканирования.

Цепная передача возвратно-поступательно перемещает кронштейн, на котором закреплен распылительный пистолет, в который компоненты поступают от установки типа "Каннон" или "Бингс"

Технические характеристики сканирующего устройства.

Ширина зоны напыления, м 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6

Скорость перемещения, м/с ..... 0,1÷1,0

Напряжение питания, В ..... 220.

Для механической обработки фрезерования теплоизоляции из пенополиуретана с целью обеспечения определенной толщины покрытия используется специальная установка. Толщина покрытия при обработке определяется с помощью токовихревых датчиков ИТН-78А, которые регулируют глубину обработки материала, а также отключают работу установки в момент получения необходимой толщины покрытия. В качестве режущего инструмента применяется иглофреза. Она представляет собой цилиндрический корпус, на который крепится кордовая (игольчатая) лента. Размеры фрезы: длина L = 900 мм, диаметр D = 300 мм. Длина иглы 8...10 мм, толщина δ = 0,3...0,4 мм, материал Х18Н10Т.

Установка снабжена электроприводом, пультом управления и аппаратурой активного контроля толщины теплоизоляции. Имеется линия отсасывания пенополиуретановой крошки.

Изготовление пенопласта должно производиться в помещении с температурой 18...25°С и относительной влажностью не более 60%. ППУ должен быть без пустот, трещин, расслоений и непроклея. Защищаемая поверхность должна быть очищена от пыли и загрязнений. Не допускается наличие следов коррозии. Очищенные поверхности должны быть обезжирены бензином, ацетоном или хладоном 113. Места, на которые не допускается попадание пенопласта, подлежат технологической защите.

Металлические поверхности, подлежащие теплоизолированию Рипором, должны быть покрыты грунтовкой ЭП-0214. Грунтовка ЭП-0214 наносится с помощью краскораспылителей С0-71, КРП-1М, СО-123. После нанесения грунтовки теплоизолируемая поверхность покрывается клеем Криосил-Р. Клей наносится шпательным методом или методом напыления. Метод напыления клея более производителен, чем шпательный метод. Напыление производится с помощью сканирующего устройства и установки типа "Бинкс". Температура изолируемой поверхности перед нанесением ППУ должна быть не менее 20°С.

Для напыления ППУ Рипор-2Р используются машины, работающие по двухкомпонентной схеме на смесях с вязкостью до 1000 Па·с, например, типа "Каннон", ПУН, П-432, П-481 и др. Машина должна иметь мешалки или систему рециркуляции на емкостях для смесей А и Б, обеспечивать соотношение компонентов А:Б=(1:2)+20% и производительность от 2 до 6 кг/мин. Параметры напыления и вспенивания, производительность, дозировка, расстояние пистолета до поверхности изделия, расход и давление воздуха, скорость движения сопла распылителя, толщина слоев, ширина яруса и прочее должны быть установлены при технологической отработке на имитаторе. Производительность установки для напыления выбирается с учетом размеров и профиля поверхности. При ручном напылении устанавливается производительность не более 2 кг/мин. При механизированном напылении допускается увеличение производительности до 6 кг/мин. Расстояние от пистолета до металла составляет 700...1000 мм. Направление движения сопла распылителя при напылении выбирается в каждом отдельном случае в зависимости от вида и конфигурации изделия.

Параметры вспенивания приведены ниже.

Время старта по металлу τ_H, с ..... 4÷8

Время гелеобразования $\tau_Г$, с ..... 9÷12

Время окончания вспенивания $\tau_К$, с ..... 12÷15

Перед напылением должны быть проведены следующие работы: проверить фактическое соотношение смесей А : Б, проверить фактическое соотношение емкостей и шлангов системы "Б". При перерыве в работе менее двух суток допускается оставлять систему "Б" заполненной для предупреждения затвердевания ПИЦ в шлангах. При полном удалении смеси "Б" систему следует промыть растворителем. Растворителями при промывке являются: для пистолета хлористый метилен; для системы "А" хлористый метилен, трихлорметилфосфат и хладон 113; для системы "Б" - трихлорэтилфосфат и хладон 113.

Пистолет должен быть открыт непосредственно перед началом напыления и первые порции массы должны быть сброшены в отходы. Убедившись, что масса из распылителя становится однородной и равномерно вспенивается, приступить к напылению. После каждой остановки пистолет должен быть немедленно промыт растворителем и продут сжатым воздухом.

Перед напылением на изделие следует изготовить блок-свидетель. На блоке-свидетеле провести экспресс-анализ плотности ППУ Образцы для экспресс-анализа плотности изготавливались из части блока-свидетеля через 30...60 мин после напыления. Образцы для проверки сдаточных показателей испытать не ранее чем через трое суток после напыления. Дополнительный контроль качества

изготовления ППУ производить из мест вырезки ППУ с напыляемой поверхности, предусмотренных чертежом.

Работа по напылению должна быть закончена в следующем порядке: факел перенести на бумагу, картон, фанеру, в полиэтиленовый мешок. После окончания работы установки немедленно отключить пистолет и промыть его хлористым метиленом в течение 4...6 с, после чего в течение 1 мин продуть сжатым воздухом. Активное выделение токсичных веществ в процессе созревания пенопласта продолжается двое суток, поэтому выдержка напыленного пенопласта перед механической обработкой должна составлять не менее 48 ч.

Наружная поверхность пенопласта должна быть механически обработана в соответствии с требованиями чертежа. Обработка производится установкой механической обработки и вручную.

После обработки на ППУ Рипор-2Н наносится внешнее покрытие. Внешним покрытием является клей ВИЛАД-5К, разведенный этилацетатом. Нанесение клея ВИЛАД-5К на поверхность ППУ Рипор-2Н производится с помощью краскораспылителей типа КРУ-1М, СО-71, СО-123. Клей ВИЛАД-5К наносится в 7...8 слоев. Выдержка нанесенного клея ВИЛАД-5К 24 ч.

6.2. Теплозащитные покрытия. Технологические процессы их нанесения

Теплозащитные покрытия (ТЗП) являются наиболее эффективным элементом системы терморегулирования в условиях воздействия больших тепловых потоков на аппарат или его часть. Целью расчета ТЗП является определение его толщины, исходя из свойств материалов и конструкции, температуры и скорости тепловых потоков [36, 54].

Основными требованиями к теплозащитным покрытиям являются: малая удельная масса, достаточные прочность, удельная прочность, вибропрочность; ТЗП должно иметь большое значение теплоемкости, жаропрочности, степени черноты поверхности, поглощать большое количество теплоты при различных химических превращениях и разрушении; быть технологичным, обладать хорошим адгезионным схватыванием с поверхностью; нижние слои покрытия не должны разлагаться раньше наружных; к ТЗП предъявляется и ряд других специальных требований, определяемых конкретными условиями.

Классификацию ТЗП производят по различным признакам.

1. По месту расположения они могут быть внешними (защита от аэродинамического или длительного лучевого нагрева) или внутренними (защита от нагрева истекающими газами работающего двигателя или других источников теплоты).

2. По защищаемым объектам: ТЗП корпуса, СА, баков, приборного отсека, крыльев и т.д.
3. По применяемым основным теплозащитным материалам ТЗП можно разделить на металлокерамические, металлопластмассовые (композиционные) и пластмассовые (полимерные), хотя в современным ТЗП чаще всего применяются комбинации различных материалов, выполняющих различные функции; иногда могут быть и металлические покрытия.
4. По температурам, на которые рассчитывают ТЗП, они иногда условно делятся на низкотемпературные (до 400°С), среднетемпературные (до 700°С), высокотемпературные (выше 700°С).
5. По принципу действия и применяемым системам и средствам охлаждения различаются активные системы, предусматривающие специальные газообразования или жидкие теплоносители для принудительного охлаждения отводом теплоты за пределы КА, а также теплообменники, радиаторы и др., и пассивные за счет теплопоглощения, излучения или уноса покрытия и т.д.; чаще всего применяется сочетание активных и пассивных систем теплозащиты.
6. В последнее время стали различать ТЗП однократного и многократного (восстанавливаемые) применения. Классификацию можно проводить и по ряду других признаков.

ТЗП классифицируются также по конструктивно-технологическим признакам.

Металлическая теплозащита с применением тугоплавких металлов наиболее проста по конструкции и технологии и ей легче придать форму корпуса по сравнению с некоторыми видами ТЗП.

Рассмотрим стационарный набегающий поток ($\rho = \text{const}$, $u_\infty = \text{const}$). Тепловой режим в некоторой характерной точке поверхности СА можно представить в виде системы уравнений теплового баланса и одновременного прогрева

$$\frac{\alpha}{c_p}\left(i_e - i_w\right) + \varepsilon_f \sigma T_r^4 - \varepsilon_w \sigma T_w^4 = -\lambda \frac{\partial T_w}{\partial x}; \quad \frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \qquad (6.3)$$

где i_e-i_w - перепад энтальпий в пограничном слое; i_e, i_w - соответственно энтальпии на внешней границе пограничного слоя газа и на стенке; α/c_P коэффициент теплообмена; $a = \lambda/(c_p\gamma)$ коэффициент температуропроводности (γ- удельная масса материала); c_P - объемная теплоемкость материала.

Используя критерий Био ($Bi = \alpha\delta_w/\lambda$), связывающий внешнее тепловое воздействие с тепловоспринимающими свойствами материала защиты, можно принять, что при $Bi \le 10^{-4}$ температура по толщине стенки δ_w в первом приближении постоянна (тонкие стенки), а при $Bi \ge 5 \cdot 10^{-3}$ градиент температуры достаточно велик (толстые

стенки). Таким образом, при малых числах *Bi* тепловой поток практически будет восприниматься всей массой материала теплозащитной системы (внутренний тепловой поток):

$$q_{ВН} = c_p \gamma_w \delta_w \partial T / \partial t. \qquad (6.4)$$

Тогда режимы работы системы, использующей радиационное охлаждение или "горячую" конструкцию, характеризуемую малыми *Bi*, можно представить уравнением

$$\frac{\alpha}{c_p}\left(I_e - I_w\right) + \varepsilon_Г \sigma T_e^4 - \varepsilon_w \sigma T_w^4 = c_p \nu_w \delta_w \frac{\partial T}{\partial t}, \qquad (6.5)$$

где первые два члена определяют внешний тепловой поток (соответственно конвективный и излучения от газа) и могут быть в первом приближении аппроксимированы функциями плотности и скорости набегающего потока

$$q_{ÂíÅØ} = f(\rho u). \qquad (6.6)$$

При стационарном режиме нагрева правая часть уравнения (6.5) будет равна нулю ($\partial T/\partial t = 0$), тогда

$$\frac{\alpha}{c_p}\left(i_e - i_w\right) + \varepsilon_Г \sigma T_e^4 = \varepsilon_w \sigma T_w^4. \qquad (6.7)$$

Из уравнений (6.5), (6.6) можно определить основные параметры рассматриваемой системы ТЗ. Металлическая ТЗ может быть однослойной или многослойной, когда верхний слой может служить покрытием для самой теплозащиты. Для металлической теплозащиты применяют сплавы титановые (до 300...500°С), никелевые, кобальтовые, молибденовые, вольфрамовые (до 1100°С), ниобиевые, танталовые (до 1300°С и выше). Ограничением для применения тугоплавких металлов и сплавов является их низкая жаростойкость резкое возрастание скорости окисления с ростом температуры. Поэтому для металлических ТЗП необходимо применение жаростойких покрытий, материалами для которых могут служить окислы и карбиды тугоплавких металлов и другие жаростойкие соединения с минимальным испарением в вакууме. Эти покрытия могут наноситься различными методами электроосаждения, пламенного и плазменного напыления, осаждением из газовой фазы, металлизацией, плакированием и т.д.

Радиационная теплозащита сравнительно проста и перспективна для СА, а также планирующих аппаратов многократного использования. Суть этого метода состоит в излучении теплоты с нагретой поверхности: при определенной равновесной температуре уравниваются значения подводимого и излучаемого потока.

Используя второй закон термодинамики, можно показать, что существует предельное количество энергии, которое может излучаться телом при данной температуре и при данной длине волны. Источник такого излучения называется абсолютно черным телом. Следует также

иметь в виду то, что равновесная температура поверхности $T_w = \sqrt{q_0/(\varepsilon\sigma)}$ не может быть выше температуры разрушения материала радиационного покрытия $T_{РАЗР}$. Поэтому максимальный тепловой поток, который снимается с поверхности (экрана) методом радиационного охлаждения, ограничен величиной

$$q_p \le \varepsilon\sigma T^4_{P\,АЗР}. \qquad (6.8)$$

Так как удельный тепловой поток излучения пропорционален четвертой степени температуры поверхности, то эффективность метода увеличивается при высоких температурах; двумя главными требованиями к материалам радиационной теплозащиты (ТЗ) являются высокие излучательная способность, жаростойкость и жаропрочность. Конструктивно радиационная система ТЗ представляет собой тонкий экран, усиленный ребрами жесткости, служащими для соединения его с несущей поверхностью; во многих случаях пространство между обшивкой аппарата и экраном заполняют теплоизолирующим материалом, например, пористой керамикой или поропластом, а ребра в точках контакта с обшивкой иногда подвергают местному конвективному охлаждению. Для внешних радиационных экранов могут использоваться тугоплавкие металлы (ниобий, молибден, тантал, вольфрам) и их сплавы с температурой плавления 2500...3400°С и коэффициентом излучения 0,8, а также керамические материалы (окись алюминия Al_2O_3, окись циркония ZrO_2, силикат алюминия $2Al_2O_3{\cdot}2SiO$) с рабочей температурой 1650°С. Экраны из тугоплавких металлов и сплавов имеют обычно жаростойкие покрытия с высокой излучающей способностью, наносимые указанными выше способами. Керамические материалы для экранов рекомендуется применять в виде пористых структур, так как наличие пор предотвращает распространение трещин и уменьшает чувствительность их к местным хрупким разрушениям.

Конвективное охлаждение поверхности производится с помощью жидкого или газообразного охладителя, омывающего нагретую поверхность.

В этом случае задача сводится к определению оптимальных значений коэффициентов теплоотдачи и температуры теплоносителя, которые, в свою очередь, зависят от характеристики теплоносителя и конструкции охлаждающего тракта. В зависимости от способа рассеяния теплоты в окружающее пространство системы конвективного охлаждения подразделяют на замкнутые и разомкнутые. Обязательным элементом первых является теплообменник, в котором охладитель, получающий теплоту от горячей стенки, рассеивает ее в окружающую среду или передает другому теплоносителю. Как правило, в этом случае необходимое количество охладителя не зависит от времени эксплуатации системы. Если принять, что весь

подводимый тепловой поток воспринимается только теплозащитой СА, то можно записать следующее уравнение теплового баланса [54]:

$$\frac{\alpha}{c_p}\left(i_e - i_w\right) + \varepsilon_r \sigma T_r^4 = \alpha_{BH}\left(T_w - T_{ж}\right), \qquad (6.9)$$

где α_{BH} коэффициент внутреннего теплообмена; $T_{ж}$ температура жидкого теплоносителя.

При относительно небольшой температуре охлаждаемой конструкции излучение, как правило, мало. Поэтому интегральный тепловой поток, воспринимаемый теплоносителем, в первом приближении может быть представлен в виде $\int_0^{t_k} q_B(t)dt = Q_\Sigma$, где t_k время работы системы.

Практически интегральный поток определяет расход и массу теплоносителя. Так как $Nu_{ж} = 0{,}021\,\mathrm{Re}_{ж}^{0,8}\,\mathrm{Pr}_{ж}^{0,43}$, то $\alpha \approx \dfrac{\lambda^{0,57}(c\gamma)^{0,43}}{\nu}$, где $Nu=\alpha l/\lambda$ - критерий Нуссельта; $\mathrm{Re}=V_i/\mu$ - критерий Рейнольдса; $\mathrm{Pr}=\nu/a$ критерий Прандтля для жидкости; a коэффициент температуропроводности; ν коэффициент кинетической вязкости жидкости. Если теплоносители жидкие металлы, то $Nu_{ж} = 4{,}5 + 0{,}014 Pe_{ж}$, где $Pe=\mathrm{RePr}$ - критерий Пекле. Отношение мощности затрачиваемого на прокачку теплоносителя в системе N_H к интегральному потоку можно в первом приближении представить в виде выражения

$$\frac{N_H}{Q_\Sigma} = \frac{\Delta p}{\rho c_p\left(T_{P.T} - T_T\right)\eta_H}, \qquad (6.10)$$

где потери давления Δp, определяемые суммой потерь на все участки при движении теплоносителя, равны

$$\Delta p = \sum_{i=1}^{n}\left(\xi_i \frac{l_i}{d_i}\right)\frac{\rho_i V_i^2}{2}, \qquad (6.11)$$

где ρ_i - плотность теплоносителя на каждом из участков его движения; η_i коэффициент полезного действия насоса; ξ_i коэффициенты гидравлического сопротивления отдельных участков тракта подачи теплоносителя; l_i, d_i длины и диаметры магистралей каналов, пор и т.д.; V_i скорость движения теплоносителя; $T_{P.T}$, T_T температура теплоносителя в резервуаре хранения и на выходе из системы; c_P теплоемкость носителя.

Мощность на прокачку равна

$$N_H = \left(m\Delta p/\rho\right)/\eta_H, \qquad (6.12)$$

где m масса теплоносителя, которую можно определить, используя соотношения (6.10) и (6.12),

$$m = Q_\Sigma \Big/ \left(c_p \Delta T\right), \qquad (6.13)$$

где $\Delta T = T_{P.T.} - T_T$ Отсюда массовый расход теплоносителя

$$\dot{m} = \frac{m}{t_k} = \frac{Q_\Sigma}{c_P \Delta T T_k} \qquad (6.14)$$

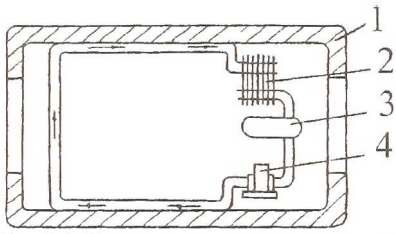


Рис.6.4. Схема конвективного охлаждения:

1 охлаждаемая стенка; 2 теплообменник; 3 - емкость для охладителя; 4 - насос

В таких системах (рис.6.4) охладителями выбирают воду, водород, гелий, жидкие металлы, соединения лития, каждый из которых имеет определенные преимущества и недостатки. Конвективное охлаждение находит широкое применение в камерах сгорания ЖРД для охлаждения огневых стенок.

Тепловая защита с твердыми теплопоглотителями. Суть метода заключается в поглощении и аккумулировании теплоты материалом оболочки или специальным теплопоглотителем, располагаемым под металлической нетолстой жаропрочной оболочкой.

Максимальное количество теплоты, которое может поглотить такая система теплозащиты, определяется зависимостью

$$Q = m \int_{T_0}^{T_{\Pi\Pi}} c_P dT = c_P m \left(T_{\Pi\Pi} - T_0\right), \qquad (6.15)$$

где m масса вещества; c_P - теплопроводность; T_0, $T_{\Pi\Pi}$ - температуры начальная и фазового превращения (плавления) материала соответственно. Подобные системы могут характеризоваться также способностью к быстрому теплоотводу (коэффициентом теплопроводности материалов), в известной степени относится к ним и требование обеспечения жаропрочности применяемых материалов. При определении характеристик такой теплозащиты целесообразно учитывать анализ её прогрева.

В безразмерном виде уравнение прогрева в первом приближении можно представить следующим образом:

$$\partial T \Big/ \partial Fo = \partial^2 T \Big/ \partial \bar{x}^2, \qquad (6.16)$$

где $Fo = at \Big/ \delta_w^2$ критерий Фурье; $a = \lambda \Big/ c_P \gamma$ коэффициент температуропроводности; $\bar{x} = x/\delta_w$ некоторая безразмерная координата толщины теплозащиты δ_w.

Уравнение (6.16) дает возможность оценить эффективность теплоаккумулирующей системы по основным критериям: способности

к поглощению теплового потока $c_P\gamma$ и быстрому теплоотводу λ. В качестве теплопоглотителя используются алюминий, железо, молибден, вольфрам, графит. Наиболее эффективными теплопоглотителями, обладающими высокими теплоемкостью, теплопроводностью и температурой плавления, являются медь, бериллий и окись бериллия.

Принудительные (активные) методы теплозащиты включают пористое, пленочное и заградительное охлаждение, они основаны на массообменном принципе. При пористом охлаждении (испарительном, выпотевании) через перфорированную или пористую стенку в пограничном слое подается жидкий или газообразный охладитель (вода, гелий, азот и др.), который, испаряясь, поглощает часть теплоты от стенки и, выходя на поверхность, снижает интенсивность теплообмена между стенкой и потоком газа. При этом необходимо учитывать, что стенка должна при заданной пористости обладать достаточными теплоемкостью и прочностью. При расчете такой системы необходимо также учитывать мощность, требуемую на прокачку теплоносителя через поры стенки, и его свойства.

Уравнение баланса тепловых потоков у стенки в первом приближении можно представить в виде

$$\varphi_{ВД}\left(\alpha / c_P\right)\left(i_e - i_w\right) = \dot{m}\,\Delta i_{ОХЛ}\,, \qquad (6.17)$$

где α/c_P коэффициент теплообмена без учета вдува; $\dot{m}$ массовый расход вдуваемого в пограничный слой охлаждения; $\varphi_{ВД}$ - коэффициент, учитывающий влияние вдува охладителя на внешний теплообмен ($0 \le \varphi_{ВД} \le 1$); $\Delta i_{ОХЛ}$ приращение энтальпии охлаждения; i_e, i_w соответственно энтальпии на внешней границе пограничного слоя газа и на стенке.

Охладители кроме высокой энтальпии для заданного предела температур должны обладать также минимальной молекулярной массой, не быть химически активными по отношению к материалу стенки (не снижать его прочностные свойства, не осаждаться на стенках каналов, пор и т.д.). В качестве охладителей используют водород, гелий, аммиак, азот, аргон, глицерин, метиловый спирт, воздух и т.д. Иногда в качестве охладителя применяют низкотемпературный сублимирующий твердый материал (например, тефлон, $NaHCO_3$). Пористое охлаждение обеспечивает равномерную подачу охладителя на защищаемую поверхность. При пленочном охлаждении подаваемая через отверстия жидкость под давлением сил трения растекается по поверхности, образуя защитную пленку, которая, испаряясь, поглощает теплоту и блокирует тепловой поток к стенке. Пленочное охлаждение может быть распределенным по всей защищаемой поверхности или локальным на определенном участке. При сохранении пленки

температура на поверхности не будет превышать температуру кипения охладителя. При заградительном охлаждении стенка изолируется от горячего потока слоем холодного газа, подводимого через щели по касательной к поверхности, что сохраняет более длительно поток вводимого газа. Все эти методы теплозащиты, имеющие много разновидностей, находят применение в камерах сгорания для охлаждения стенок, в агрегатах КА, предназначенных для входа в атмосферу. Испарительное и пленочное охлаждение иногда применяются в абляционных системах ТЗ для повышения их эффективности.

Абляционная теплозащита является в настоящее время самым распространенным видом ТЗ в конструкциях КА. Абляционная система ТЗ относится к расходуемым типам ТЗ, основанным на массо- и теплоуносе с нагретой поверхности.

Эффект теплозащиты обуславливается следующими явлениями:

- поглощением теплоты при нагревании поверхностного слоя покрытия до температуры фазовых превращений или химических реакций;
- поглощением теплоты при физических (плавление, испарение, сублимация) и химических превращениях нагретого слоя;
- поглощением энергии в результате механического разрушения и уноса продуктов физико-химических превращений;
- излучение энергии нагретым поверхностным слоем материала;
- поглощение теплоты на нагревание и разложение высокомолекулярных газов при их испарении через обугленный верхний слой покрытия;
- блокированием теплового потока газообразным пограничным слоем покрытия.

В процессе абляции одновременно протекают различные механические и физико-химические процессы:

- нагрев определенного слоя покрытия с некоторым градиентом температур;
- распределение связующего и наполнителя;
- унос расплавленного покрытия под действием встречного потока;
- сублимация покрытия;
- скалывание частиц покрытия, образование трещин, эрозия поверхности, повреждение поверхности уносимыми частицами;
- срыв и унос ослабленных нагревом слоев ТЗП;
- испарение жидкой фракции и разложение высокомолекулярных газов при их прохождении через обугленный слой;
- процесс пиролиза, при котором уносятся газообразные, жидкие и твердые продукты разложения;
- сгорание и окисление слоя ТЗП и т.д.

Рассмотрим схему тепловой защиты КА с физико-химическими превращениями. Деполимеризация термопластов может происходить, например, в широком диапазоне температур, тогда как для других типов теплозащит начало интенсивного поверхностного уноса, как правило, связывается с некоторой мало изменяющейся температурой. В этом случае унос определяется профилем температуры в поверхностном слое $T(x)$ [46]. Для стационарного уноса (при постоянных внешнем теплонагружении, скорости уноса и профиле прогрева) функция температур определяется следующей зависимостью:

$$T(x) = T'_{\text{w}} + \left(T_{\text{w}} - T'_{\text{w}}\right)\exp\left[-\dot{m}_{\text{w}}\, x \Big/ a\rho\right], \qquad (6.18)$$

где T_{w}, T'_{w} температуры на поверхности и в глубине теплозащитного покрытия соответственно; $\dot{m}_{\text{w}}$ массовый унос, $\dot{m}_{\text{w}} = \sqrt{a\rho}\,10^{k_1 T_{\text{w}}^2 + k_2 T_{\text{w}} + k_3}$; k_1, k_2, k_3 коэффициенты, определяющие свойства деполимеризующегося материала.

Общие требования, предъявляемые к материалам систем, базирующихся на физико-химических превращениях, следующие:

- поглощение максимально большого количества теплоты при физико-химических превращениях и наличие высоких значений объемной теплоемкости;
- достаточно хорошая прочность при высоких температурах;
- большое значение степени черноты и максимально возможная температура разрушающейся поверхности;
- образование газообразных продуктов с малыми молекулярными массами при разрушении;
- относительно большая вязкость жидкой пленки, образующейся на поверхности при физико-химических превращениях.

Для абляционных покрытий малоэффективными оказались металлы, их окислы, различные керамические материалы вследствие малой теплоемкости и большой теплопроводности. Более эффективен пиролитический графит (обладающий анизотропными свойствами), вследствие большой скрытой сублимации и высокой термостойкости. Наиболее эффективными оказались полимеры и особенно композиционные материалы на их основе.

По характеру разрушения абляционные материалы разделяют на сублимирующие, плавящиеся, обугливающиеся и окисляющиеся.

К сублимирующим относятся материалы, разрушающиеся при нагреве с образованием, минуя жидкую, непосредственно газовой фазы (фторопласт, графит, тефлон), которая главным образом и определяет эффект теплозащиты. Эта система охлаждения, как пра-

вило, высокоэффективна, недорога и достаточно компактна. Разделение поверхностей охлаждения и области испарения и сублимации снижает засоряемость каналов системы и может в конечном счете существенно увеличить срок её эксплуатации по сравнению с системами охлаждения на основе пористых металлических матриц. В состав этой активной системы охлаждения обычно входят теплообменник со слоем пенополиуретана на внешней поверхности и равномерно распределенными по поверхности теплообменника каналами для хладагента. Работает она подобно системам, применяемым в космических скафандрах (рис.6.5).

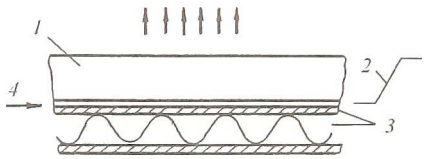


Рис.6.5. Зона сублимации хладагента:
1 лед внутри пеноматериала внешнего слоя; 2 - распределение давления паров внутри пеноматериалов; 3 - элементы конструкции; 4 - пульсирующий поток воды вдоль поверхности конструкции

К плавящимся относятся материалы, разрушающиеся при нагреве, образуя жидкую фазу, которая может растекаться по защищаемой поверхности, уноситься с нее и частично испаряться (материалы на основе стекла и кварца, оргстекло, полиэтилен и т.д.). К обугливающимся (коксующимся, пиролизным) относятся в основном полимерные композиционные материалы (например, фенольный нейлон), процесс разрушения которых при нагреве сходен с газификацией при коксовании, и эффект теплозащиты у них связан с процессами разложения материала, уноса газообразных и твердых частиц, излучением и блокированием теплового потока.

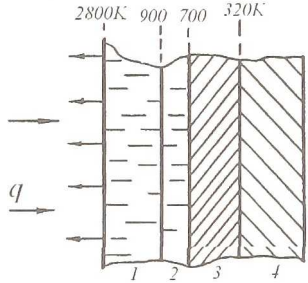


Рис.6.6. Распределение зон в коксующемся сублимирующем материале (фенольный углепластик) при установившемся уносе:
1 - слой кокса; 2 - переходная зона неполного коксования; 3 слой исходного уносимого материала; 4 - металлическая несущая конструкция корпуса КА

Механизм взаимодействия композиционных материалов с газовыми потоками для подобных систем теплозащиты достаточно сложен из-за множества химических, физических и механических процессов. На рис.6.6 показано состояние материала коксующегося типа (фенольный углепластик) в процессе работы (уноса). Слой исходного композиционного материала отделяет силовую конструкцию от зоны пиролиза и слоя кокса. Слой кокса, расположенный у поверхности уноса, представляет собой пористую карбонизированную зону, образованную в результате пиролитической деструкции связую-

щего (и других органических компонентов, например, нейлона), в то время как фронт пиролиза перемещается в направлении исходного материала. Газообразные продукты деструкции, например, водород, аммиак и углеводороды, просачиваются через поры и микротрещины в нагретом слое кокса. Происходит теплообмен между этими газами и карбонизированной средой, и газообразные продукты с высокой скоростью вылетают с поверхности в пограничный слой (последний является частью ударного слоя, непосредственно примыкающего к поверхности уноса). Такой выброс газообразных продуктов пиролиза препятствует распространению поля теплового потока, и в результате этого может уменьшиться конвективный тепловой поток, достигающий корпуса аппарата. Этот блокирующий эффект, известный как охлаждение путем уноса материала, усиливается с увеличением скорости входа СА в плотные слои атмосферы и энтальпии воздуха. На поверхности уноса происходят различные реакции, причем каждая из них ведет к уменьшению толщины материала и уменьшению расстояния между наружной поверхностью теплозащиты и несущей конструкцией.

К окисляющимся относятся такие материалы, которые при нагреве интенсивно, с поглощением значительного количества теплоты, окисляются (горят), в чистом виде такие покрытия применяются редко.

Основными компонентами композиционных абляционных покрытий являются связующие и наполнители. В качестве связующих широко применяют органические и неорганические соединения: фенольные, фенолформальдегидные, эпоксидные, силиконовые, полиэфирные и другие смолы, различные каучуки, полимеры, ненасыщенные фосфаты и т.д. В качестве наполнителей применяют текстолит, асбестовые волокна, стекло, графит, различные полимерные волокна, двуокись кремния (рефразил), волокна на основе двуокиси циркония, силиката циркония и т.д. Наполнители применяются в виде порошка, зерен, волокон и тканей. Широко используется метод намотки внахлест. Основные режимы намотки натяжение нити, скорость и шаг намотки, толщина или ширина нити (ленты). В зависимости от геодезии намотки, углов ориентации, режимов, вида ленты и наполнителя различают параллельную и наклонную намотку, краевую укладку, методы изготовления ТЗП из слоистых пластиков, метод послойной выкладки, различные комбинированные методы укладки, а также методы с хаотичным расположением волокон и т.д. В зависимости от способа и стадии пропитки наполнителя связующим (нанесение связующего) различают мокрый, полусухой, пропитка заготовки под давлением и ряд других способов нанесения связующего. Важным этапом технологического процесса, влияющим на качество покрытия и экономику, является их формирование. Различают ваку-

умный, автоклавный, прессовый, беспрессовый способы, способы пресс-камеры, моментального отверждения и т.д. Особым при изготовлении ТЗП из композиционных материалов является вопрос о механической обработке с целью обеспечения необходимой точности, качества и состояния поверхности, сохранения свойств покрытия.

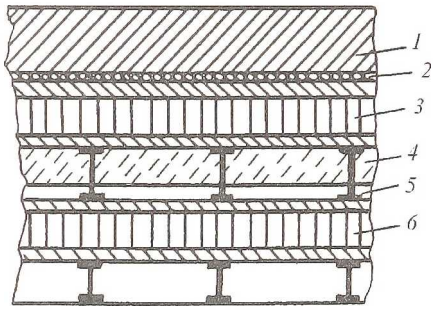


Рис.6.7. Двухслойная конструкция ТЗП:
1 - абляционный слой; 2 - клеевой слой; 3 - сотовая панель; 4 - теплоизоляция; 5 - несущий элемент; 6 - основная сотовая стенка корпуса

Технологические процессы изготовления усложняются для ТЗП сотовой конструкции, особенно если они имеют несколько слоев, хотя теплозащитные свойства их значительно выше, чем у ТЗП обычного типа (рис.6.7).

Такие многослойные ТЗП с высокой надежностью и стоимостью обычно предназначаются для пилотируемых КА, возвращаемых на Землю. Для беспилотных КА и для тепловой защиты КА на орбите обычно применяют более простые ТЗП, состоящие из абляционного покрытия рассчитанной толщины, приклеенной к основной конструкции аппарата.

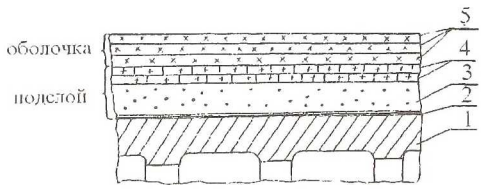


Рис.6.8. Конструкция ТЗП:
1 - корпус КА; 2 - клей БФ; 3 - асбонить; 4 - асбомешок; 5 - стеклотекстолитовые ленты

Рассмотрим технологический процесс получения клеевых теплозащитных покрытий на изделиях цилиндрической и конической формы. Конструкция наносимого ТЗП приведена на рис.6.8. Перед процессом нанесения ТЗП, проводят контроль исходных материалов: клея, асбонити, асбомешков, стеклотекстолитовых лент на вязкость (клея), жизнеспособность, прочность, влагопоглощаемость, твердость и т.д. Весь процесс нанесения ТЗП делится на несколько этапов:

1 этап. Подготовка поверхности изделия под нанесение покрытия.

1. Опескоструивание чистым мелким кварцевым песком.
2. Испытание корпуса на герметичность.
3. Очистка и обезжиривание поверхности изделия в целях лучшей адгезии клея и покрытия (протирка салфетками, смоченными бензином Б-70, ацетоном или уайт-спиритом).
4. Взвешивание.

2 этап. Нанесение подслоя.

1. Нанесение первого слоя клея БФ-4 кистью. Выдержка при температуре 20°С в течение 1...2 ч.
2. Нанесение второго слоя клея БФ-4. Выдержка при температуре 20°С в течение 2 ч и при температуре 60°С в течение 1 ч. Выдержка клея при высокой температуре необходима с целью удаления летучих веществ в клее, наличие которых приводит к разрыхлению клеевой пленки, а следовательно к снижению прочности клеевого соединения.

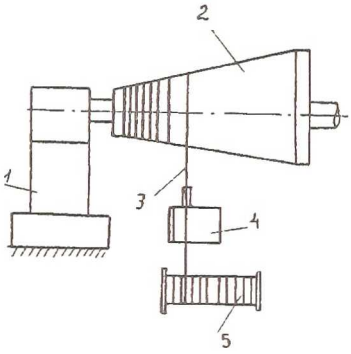


Рис.6.9. Схема намотки асбонити:
1 - станок; 2 - изделие; 3 - асбонить; 4 - приспособление для нанесения клея; 5 - катушка с асбонитью

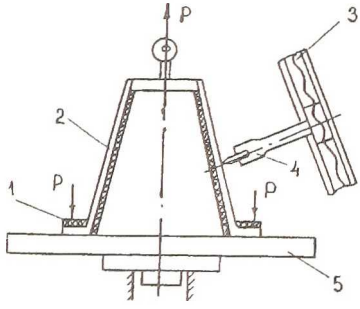


Рис.6.10. Схема одевания асбомешка:
1 прижимное кольцо; 2 асбомешок; 3 направляющая рамка обкатки; 4 ролик; 5 - поворотное приспособление

3. Намотка асбонити. Производится на специальных станках типа токарных, приспособленных для намотки (рис.6.9).
4. Надевание асбомешков. Предварительно мешки проходят сушку при температуре 60°С в течение 6 ч, затем пропитываются фенолформальдегидной смолой. Надевание производится на специальном поворотном приспособлении с применением подъемных средств и разглаживающего устройства со специальным роликом (рис.6.10). Число мешков определяется из условия необходимой толщины покрытия.

3 этап. Вакуумирование подслоя.

Эта работа заключается в создании определенного давления с помощью резинового мешка из специальной термостойкой резины и температуры для отвердевания подслоя (рис.6.11). Нагрев производится в шахтной печи. Особое внимание обращается на строгий режим скорости нагрева и охлаждения, на равномерность подъема температуры (рис.6.12). Это дает возможность исключить внутреннее напряжение, разрушение и непроклей подслоя. После охлаждения на воздухе оснастка разбирается, и производится контроль качества подслоя, для чего вырезаются специальные образцы из припуска и отдаются на испытание в лабораторию. Непроклей контролируют простукиванием.

4 этап. Изготовление оболочки.

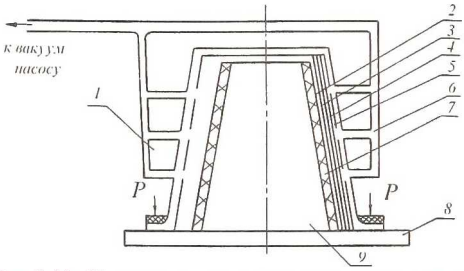


Рис.6.11. Схема оснастки для вакуумирования:
1 - коллектор; 2 - подслой; 3 - целлофан; 4 - металлические сектора; 5 металлическая сетка; 6 - двушитка; 7 - резиновый мешок; 8 - плита; 9 - изделие

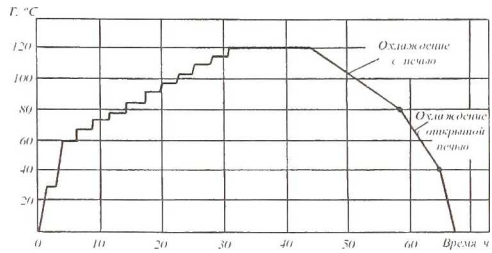


Рис.6.12. Циклограмма режима вакуумирования

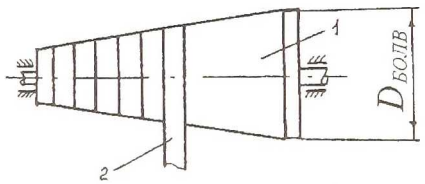


Рис.6.13. Схема изготовления оболочки

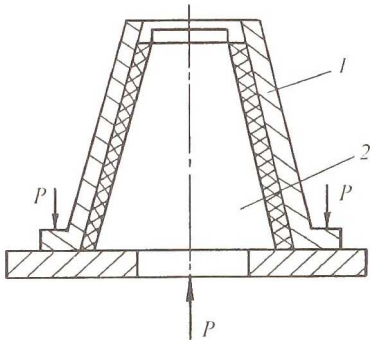


Рис.6.14. Схема прессования оболочки:
1 - матрица; 2 - болванка

Изготовление оболочки производится путем намотки стеклотекстолитовой ленты *2* на болванку *1*, размеры которой выполнены с учетом размеров изделия и толщины подслоя (рис.6.13). Для того, чтобы оболочка не приклеилась к болванке, она обмазывается специальной жидкой резиной. Предварительно производится подготовка стеклотекстолитовой ленты: раскрой на специальных машинах и резка, пропитка фенолформальдегидной смолой. Ширина ленты 100...150 мм. Режим намотки: скорость 1...3 м/мин; сила натяжки 200...300 Н; подача 2,5 мм/об.

5 этап. Прессование оболочки.

Прессование оболочки производится по специальной матрице с давлением P = 2,5 МПа и нагревом до температуры 140°С (рис.6.14, 6.15).

6 этап. Склеивание оболочки с подслоем.

1. Зачистка поверхностей склеивания шкуркой.
2. Протирка поверхностей бензином.
3. Нанесение клея на поверхности склеивания, выдержка.
4. Надевание оболочки на подслой в специальном приспособлении.
5. Прессование при температуре, аналогичной предыдущему этапу, и давлении 0,5 МПа.

7 этап. Контроль качества склейки покрытия. Производится испытание образцов и простукивание.

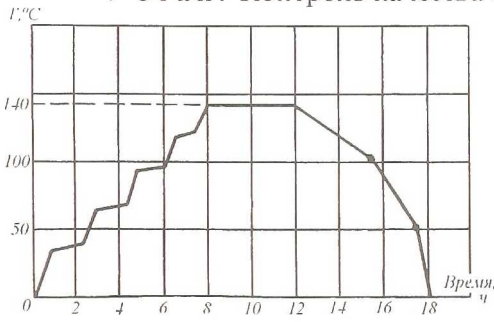


Рис.6.15. Циклограмма режима прессования оболочки

8 этап. Механическая обработка покрытия. Покрытие обрабатывается в размер по толщине согласно чертежу. Производится торцовка.

9 этап. Взвешивание.

10 этап. Шпаклевка и нанесение лакокрасочного покрытия.

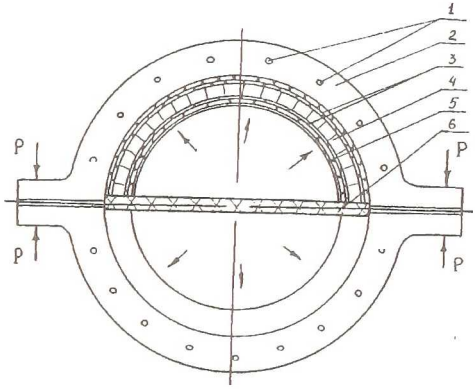


Рис.6.16. Схема нанесения покрытия на сферические тела:
1 теплоэлектронагреватели; 2 пресс-форма; 3 - асбомешок; 4 - ультралегковес; 5 - клей; 6 - асботекстолитовый пояс

Технологический процесс нанесения теплозащитных покрытий на изделия сферической формы включает следующие операции.

1. Подготовка поверхности изделия под нанесение покрытий.
2. Нанесение подслоя (клея и асбомешков).
3. Изготовление кирпичного покрытия (ультралегковес пенонамотный упорный), предварительная укладка и нумерация.
4. Приклейка кирпичного покрытия при нормальной температуре с применением резиновых поясов.
5. Обработка кирпичного покрытия по шаблону.
6. Нанесение нескольких асбомешков покрытия.
7. Установка половинки матрицы.

8-14. Повторение операций с 1 по 7 для второй половины.

15. Прессование в пресс-форме при внутреннем давлении 0,15 МПа и внешнем 0,5 МПа (рис.6.16). Термообработка в течение 24...48 ч со ступенчатым нагревом до температуры 140°С.
16. Доработка мест непроклея.
17. Механическая обработка.
18. Замер. Взвешивание.
19. Передача изделия под окраску, монтаж.

6.3. Контроль качества покрытий

Качество покрытий определяется следующими его свойствами и техническими требованиями: необходимой толщиной покрытия; необходимой плотностью; адгезией с покрываемым материалом; необходимой прочностью и т.д. Контроль качества покрытий производится неразрушающими и разрушающими методами контроля.

Контроль толщины. Контроль толщины стеклотекстолита или плиточного теплоизоляционного волокнистого материала, разреженного стеклотекстолита, пористого наполненного термопласта производится вихревым методом прибором ЭМАТОЛ ТНП-02М [71].

Вихревой метод контроля основан на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой (датчиком) в электропроводящем материале металлоконструкции аппарата. Электромагнитное поле вихревых токов воздействует на катушку (датчик), наводя в нем ЭДС или изменяя её полное электрическое сопротивление.

Регистрируя напряжения на зажимах катушки или её сопротивление, получают информацию об измеряемом показателе. Плотность вихревых токов зависит от геометрических и электромагнитных параметров металлоконструкции аппарата, а также от взаимного расположения измерительного датчика и аппарата. Установка датчика на немагнитный металл аппарата приводит к двум явлениям.

Часть энергии поглощается металлом и выделяется в виде тепловых потерь, а другая часть энергии отражается от поверхности металла, уменьшая индуктивное сопротивление катушки датчика и её индуктивность. При установке датчика на магнитный металл к этим явлениям добавляются еще два: некоторое увеличение индуктивности катушки (датчика) за счет магнитной проводимости металла аппарата и значительное возрастание активных потерь с ростом частоты питающего тока, что приводит к большой погрешности замера.

В качестве первичного измерительного преобразователя прибора ЭМАТОЛ ТНП-02М используется дифференциальный трансформаторный датчик с ферритовым сердечником.

Технические характеристики прибора ЭМАТОЛ ТНП-02М.

Измеряемая толщина покрытия, мм ..... 3÷40
Суммарная погрешность измерения, % ..... не более 2
Габаритные размеры датчика, мм ..... 130×100×50
Масса датчика, кг 0,5

Контроль толщины покрытия осуществляется в указанной ниже последовательности:

- разметка контролируемых точек на внешней поверхности покрытия по двенадцати образующим аппарата через каждый 30° с шагом 150 мм вдоль образующей;
- настройка толщиномера по образцу-эталону, являющемуся приложением к прибору;
- установка датчика прибора в размеченную точку покрытия;
- отсчет показания по стрелочному индикатору;
- запись результатов контроля в протокол;
- расчет толщины теплозащитного покрытия.

Толщина стеклопластика (первого слоя) определяется непосредственно при контроле, а для последующих слоев покрытия толщина рассчитывается как разность показаний замеренного и предыдущего.

Контроль плотности теплозащитного материала осуществляется путем обмера и взвешивания образцов размером 20×30×(3...20) мм. Отклонение углов от прямого не должно превышать 0,5°, а взвешивание производится с точностью до 0,0002 г. Образцы вырезаются из технологического припуска в количестве не менее 5 штук.

Плотность материала ρ, кг/м^3, определяется по формуле $\rho = m/V$, где m масса образца, кг; V - объем образца, м^3.

Контроль плотности покрытий проводится также радиационным методом. Для контроля плотности в производстве применяются радиоизмерительные приборы типа РФ-13РДФ. Прибор состоит из датчика и электронно-измерительного блока. Датчик предназначен для радиоизотопного источника Америций-211 и защиты обслуживающего персонала от излучения. Измерения рассеивающей способности материала производятся с помощью датчика. Полученный сигнал после обработки электронно-измерительным блоком поступает на аналогоцифровой преобразователь прибора, а затем на цифровой индикатор, указывающий значение плотности. При работе с радиоизотопными приборами необходимо строго соблюдать правила техники безопасности. Диапазон измерения плотности от 20 до 100 кг/м^3. Масса прибора 7 кг. Масса датчика 2,5 кг.

Контроль непроклея и расслоений. При проведении контроля первых опытных узлов обычно используются разрушающие методы, позволяющие проверить обеспечение выбранным технологическим процессом и оборудованием необходимой прочности клеевых соединений. Последующие изделия контролируются без разрушения.

Фирма "Фоккер" разработала систему контроля клеевых соединений. Система предусматривает построение кривых, устанавливающих зависимость между пределом прочности на сдвиг и отношением толщины листа к длине нахлеста δ/l по данным испытания образцов (рис.6.18).

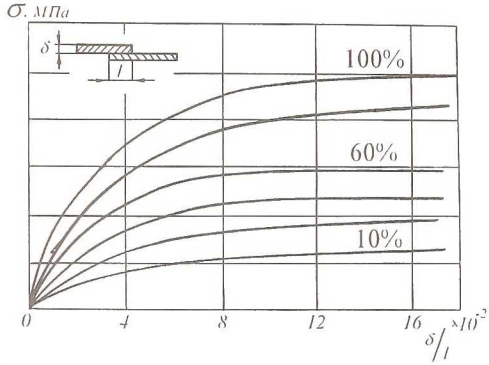


Рис.6.18. Зависимость предела прочности на сдвиг от качества проклейки образцов

Кривая, соответствующая 100% качества, строится по результатам испытания образцов, имеющих полную площадь склеивания. Другие кривые строятся для 90, 80% и т.д. площади склеивания. Кривые могут быть построены для любых клеев и материалов. Чтобы определить качество склейки изделия, необходимо испытать на сдвиг образцы, вырезанные из припуска либо образцы-свидетели. По результатам испытания и известного соотношения δ/l определяется качество склеивания.

В зависимости от условий работы все узлы разбиты на три класса (указывается в чертежах): класс А качество не ниже 80%; класс В - качество не ниже 50%; класс С - качество не ниже 25%.

Неразрушающие методы контроля качества склеивания покрытия.

1) Метод свободных колебаний. Этот метод основан на возбуждении с помощью удара свободных колебаний в клеевом шве контролируемого изделия. Наличие непроклея определяется по изменению частоты свободных колебаний и, следовательно, по тону излучаемого звука. Оценка качества клеевого шва производится контролером на слух. Разновидностью этого метода является контроль швов простукиванием, однако этот метод ненадежен, так как целиком зависит от опыта контролера;

2) Проверка с помощью акустического дефектоскопа. Контроль непроклея стеклопластика или приточного теплоизоляционного волокнистого материала к металлоконструкции или разреженному стеклотекстолиту, а также расслоений в асботекстолите или стеклотекстолите осуществляется импедансно-акустическим методом прибором ИАД-3. Акустический импедансный метод дефектоскопии основан на различии определяемых в точке ввода колебаний механических импедансов бездефектного и дефектного с воздушной прослойкой между элементами участков конструкции покрытия.

Механическим импедансом z называется отношение возмущающей силы F к вызываемой его колебательной скорости v частиц среды в точке приложения силы: $z=F/v$. В импедансном акустическом методе сила F изменяется по синусоидальному закону. Величины z, F, v являются комплексными и содержат действительную (активную) и мнимую (реактивную) части. При контроле этим методом в

теплозащитном покрытии возбуждаются изгибные колебания звукового диапазона частот. Механический импеданс зависит от размеров, плотности, упругих свойств материала и степени поглощения упругих колебаний в покрытии.

При возбуждении изгибных колебаний в многослойной конструкции покрытия механический импеданс в точке приложения возбуждающей силы определяется всеми элементами покрытия, соединяемыми в одну механическую систему. Если отдельные слои покрытия связаны между собой, оно колеблется как единое целое и механический импеданс $z_1=F_1/v_1$ имеет максимальное значение. При отсутствии сцепления между элементами покрытия колебательный режим отдельного участка будет существенно отличаться вследствие ослабления связи с остальной частью покрытия. Поскольку жесткость отдельного элемента меньше жесткости всей конструкции покрытия в целом, механический импеданс в зоне дефекта $z_2=F_2/v_2$ оказывается меньше, чем на участке с хорошим соединением ($z_2<z_1$). Таким образом, дефект соединения может быть выявлен по изменению измеренного с поверхности покрытия механического импеданса.

Импедансно-акустический метод используется в двух вариантах амплитудном и фазовом. В амплитудном варианте механический импеданс оценивается по амплитуде силы реакции контролируемого теплозащитного покрытия на возбуждающий его стержневой датчик. Фазовый вариант отличается от амплитудного тем, что дефект фиксируется по изменению фазы силы реакции покрытия на датчик. Практически чаще при контроле используется амплитудный вариант [71].

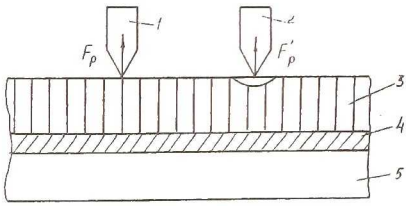


Рис.6.19. Схема амплитудного варианта акустического импедансного метода контроля: 1 датчик; 2 датчик, установленный в дефектной зоне; 3 стеклосотопласт; 4 клеевой слой; 5 - металлический корпус КА

В случае расположения датчика *2* (рис.6.19) над дефектной зоной стеклосотопласт *3* колеблется независимо от металлоконструкции аппарата *5*. Поскольку жесткость стеклосотопласта существенно меньше жесткости всей конструкции аппарата, сила реакции F_p резко уменьшается. Изменение этой силы и фиксирует прибор.

Технические характеристики дефектоскопа ИАД-3.

Диапазон рабочих частот, кГц ..... 1÷8
Минимальная площадь дефекта, выявленного по амплитудному варианту при глубине залегания не более 7 мм, мм^2 19,6
Минимальная площадь дефекта, выявленного по амплитудному варианту при глубине залегания более 7 мм, мм^2 40

Дефектоскоп ИАД-3 со специальной приставкой и механической частью, включающей в себя устройство для перемещения датчика по поверхности контролируемого покрытия, позволяет производить автоматизированный контроль непроклеев и расслоений в покрытии. Для выбора оптимальных режимов контроля и определения чувствительности метода изготовляются образцы-эталоны с искусственными или естественными дефектами различных размеров. Эти образцы-эталоны должны иметь те же основные параметры (материал, толщина), что и контролируемое покрытие и металлоконструкция. Размеры дефектов в образцах-эталонах и глубина их залегания выбираются в зависимости от норм допустимых дефектов и ожидаемой чувствительности метода на покрытиях данного типа.

Контроль непроклеев и расслоений осуществляется в следующей последовательности:

- настройка дефектоскопа по образцу-эталону;
- перемещение датчика дефектоскопа по поверхности покрытия с легким нажимом со скоростью не более 10 м/мин, при этом расстояние между соседними следами движения датчика выбирается равным 60...80% от минимальной протяженности допустимого дефекта, а ось датчика не должна отклоняться от положения, перпендикулярного к поверхности покрытия, больше чем на 10%;
- регистрация дефектов фиксируется включением расположенной в датчике сигнальной лампы, дефекты зоны очерчиваются на поверхности покрытия мягким цветным карандашом, где указываются размеры дефектов, места их расположения.

В ряде случаев необходимо производить также **контроль массы материала покрытия**. Его осуществляют взвешиванием металлоконструкции аппарата до и после нанесения покрытия на весах, имеющих погрешность ±2 кг.

Контроль профиля обработанной поверхности теплозащитного покрытия производится с помощью шаблонов по двенадцати сечениям, проходящим через вершину металлоконструкции аппарата. Проверяется щупом зазор между обрабатываемой поверхностью и шаблоном в точках, расположенных на расстоянии друг от друга 250...300 мм по образующей поверхности.

Контроль зазоров между сопряженными частями покрытия проводится щупом через каждые 30...40 мм длины сопряжений.

Контроль разрушающего напряжения при сжатии материала покрытия основан на нагружении испытуемого образца сжимающей нагрузкой при установленной скорости деформации. Приложение нагрузки на образец может осуществляться как перпендикулярно, так и параллельно направлению основы тканого наполнителя слоистого материала. Для ячеистых (сотовых) материалов приложение нагрузки осуществляется вдоль стенок, а для волокнистых плиточных

теплоизоляционных материалов перпендикулярно плоскости прессования. Образцы для слоистых материалов изготовляются в виде прямоугольной призмы с площадью снования не менее 25 см². Опорные плоскости должны быть перпендикулярны направлению приложения нагрузки при сжатии и параллельны между собой. Высота образца составляет 10...40 мм. Для ячеистых материалов высота образца должна составлять 15 мм. Высоту, ширину и длину образца измеряют с погрешностью не более 0,01 мм и не менее чем в трех местах, и по минимальным значениям вычисляют поперечное сечение образца.

Контроль содержания связующего в пропитанном наполнителе и материале покрытия осуществляется путем сушки и выжигания связующего в образце массой 1,5...2 г при температурах соответственно (100±5)°С в течение 2 ч и 500...600°С до получения постоянной массы. Образцы вырезаются из технологического припуска в количестве не менее пяти. Содержание связующего C, %,

$$C = \left[1 - \frac{m_2 - m_0}{(m_1 - m_0)(1 - 0{,}01\alpha)}\right] 100 ,$$

где m_0 - масса пустого тигля, г; α - коэффициент, учитывающий потери при прокаливании, %; $\alpha=(m_1-m_2)/(m_1-m_0)100$; m_1 масса тигля с навеской пропитанного наполнителя после сушки, г; m_2 - масса тигля с навеской пропитанного наполнителя после прокаливания, г.

Контроль содержания летучих веществ связующего в пропитанном наполнителе производится путем сушки образцов размером не менее 50×50 мм в термошкафу при температуре 100±5°С в течение не менее 10 мин и взвешивания до и после сушки с точностью до 0,0002 г. Образцы вырезаются из технологического припуска в количестве не менее пяти штук. Содержание летучих веществ ($C_л$, %) определяется по формуле $C_л = \frac{m_1 - m_2}{m_1} 100$, где m_1 масса образца пропитанного наполнителя, г; m_2 - масса образца после сушки, г.

Контроль степени отверждения материала покрытия производится путем определения массы неотвержденного связующего после погружения в ацетон измельченного образца массой 5 г.

Степень отверждения χ, %, рассчитывается по формуле

$$\chi = \left(1 - \frac{m_1 - m_0}{m_2 C}\right) 100 ,$$

где m_0 - масса пустой колбы, г; m_1 масса колбы с экстрагированной смолой после высушивания до постоянной массы при температуре (100±5)°С, г; m_2 масса испытуемого материала, г; C содержание связующего в испытуемом материале, %.

7. БАЛАНСИРОВКА АГРЕГАТОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Основной задачей повышения точности полета ЛА является повышение точности движения центра масс, а также повышение точности ориентации его конструкции относительно траектории движения.

Движение центра масс ЛА осуществляется за счет работы основного двигателя, вектор тяги которого должен проходить через центр масс ЛА. В случае несовпадения вектора тяги и центра масс изделия будет возникать возмущающий момент, для ликвидации которого потребуется затратить определенное количество энергии. Это приведет к дополнительному расходу рабочего тела, который может быть недопустимо большим при отклонении центра масс ЛА относительно конструктивных осей больше допустимого по расчету. При этом ухудшается и управляемость ЛА, так как момент сил управляющих двигателей или органов управления будет изменяться за счет возмущающего момента основного двигателя.

Ориентация ЛА осуществляется с помощью управляющих двигателей или других органов управления, создающих момент сил относительно главных центральных осей инерции ЛА. Для определения значения управляющего импульса необходимо с максимальной точностью знать положение главных центральных осей инерции ЛА относительно его конструктивных осей, а также инерциальные характеристики ЛА (центробежные моменты). Поэтому производство ЛА в настоящее время требует повышения точности размещения масс изделий, что необходимо для получения лучших технических (устойчивость и управляемость в полете) и экономических (уменьшение массы, снижение расхода топлива и т. п.) характеристик изделий. Это, в свою очередь, приводит к необходимости измерения характеристик размещения масс изделий, т. е. определения положения центра масс, измерения осевых и центральных моментов инерции и определения положения главных осей изделия. Для замера указанных параметров в производстве применяются процессы статической и динамической балансировки. На рис.7.1 представлена условная классификация основных методов и разновидностей балансировки, применяемых при изготовлении ЛА [24, 76].

При определении действительного положения центра масс или статической балансировке применяется, в основном, весовой метод, а при измерении моментов инерции метод падающих грузов, а также метод крутильных колебаний (сохранение терминов "весовой метод" и "центр масс" не является противоречивым, подобно тому, как фактическое значение массы определяется путем взвешивания).

Рис. 7.1. Классификация методов балансировки

Процессы балансировки и измерения вышеуказанных параметров проводятся на специальном оборудовании, балансировочных и измерительных стендах. Принцип работы и конструкция стендов зависят от размеров и массы проверяемых изделий, а также от требуемой точности измерения.

7.1. Определение положения центра масс изделий (статическая балансировка)

Статическая балансировка изделий сводится к определению положения центра масс изделий относительно основных геометрических осей (продольной и поперечных) и обеспечению допустимого смещения его от теоретического.

Координаты центра масс изделия определяются по формулам:

$$X_{ЦМ} = \frac{\sum_{k=1}^{n} m_k x_k}{\sum_{k=1}^{n} m_k} = \frac{\sum_{k=1}^{n} m_k x_k}{m};$$

$$Y_{ЦМ}=\frac{\sum_{k=1}^{n} m_k y_k}{\sum_{k=1}^{n} m_k}=\frac{\sum_{k=1}^{n} m_k y_k}{m}; \qquad (7.1)$$

$$Z_{ЦМ}=\frac{\sum_{k=1}^{n} m_k z_k}{\sum_{k=1}^{n} m_k}=\frac{\sum_{k=1}^{n} m_k z_k}{m},$$

где $X_{ЦМ}$, $Y_{ЦМ}$, $Z_{ЦМ}$ - координаты центра масс изделия; m_k масса произвольного элемента изделия; x_k, y_k, z_k координаты произвольного элемента относительно конструкторских осей; m - масса изделия.

Допустимое смещение центра масс зависит от массы изделия, Например, по данным статистики для изделий массой $G \le 1 \cdot 10^3$ кг допуск на смещение центра масс должен находиться в круге $r = 0.5...5$ мм. Для изделий массой $(1...5) \cdot 10^3$ кг допуск $r = =5...10$ мм, а для изделий массой свыше $5 \cdot 10^3$ кг допуск $r = 15...20$ мм. Точность балансировки должна быть не более 20...30% допуска.

Для определения положения центра масс применяются разнообразные конструкции весовых стендов, отличающихся числом используемых весов-опор (с одними, двумя и тремя весами).

Кроме того, на отдельных стендах можно производить замер положения центра масс изделия только вдоль продольной оси или только в плоскости, перпендикулярной продольной оси, или сразу по трем координатам

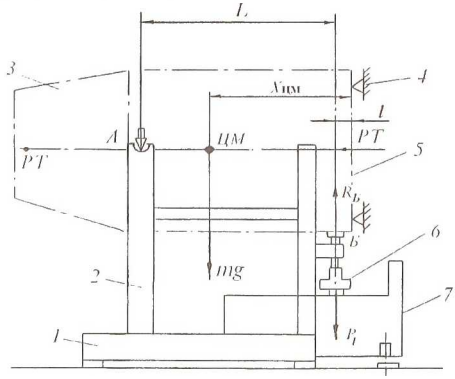


Рис. 7.2. Схема балансировочного стенда с одними весами

Начнем рассмотрение процесса определения центра масс изделия на стендах с **одними весами**. Одновесовые стенды в основном применяются для балансировки малогабаритных агрегатов изделий.

На рис.7.2 показана схема стенда для определения центра масс (ЦМ) вдоль продольной оси изделия *3*. В этом стенде использован принцип замера реакции от веса изделия на опору *Б*, расположенную на весах. Другой опорой изделия являются жесткие призмы *А*. Расстояние между жесткой опорой *А* и регулируемой

опорой *Б* задается конструкцией стенда. Стенд состоит из основания *1*, на котором имеются две призматические опоры *А*, установленные на стойках *2*, и подвижная опора *6*, установленная на весах *7*.

Порядок определения положения ЦМ на продольной оси изделия следующий. Вначале определяется реакция от веса изделия на подвижной опоре. Изделие, предварительно взвешенное, устанавливается на опоры в горизонтальное положение по реперным точкам (РТ) с помощью нивелира. Для совмещения базы отсчета стенда с плоскостью разъема изделие торцем *5* должно касаться упоров *4*. Расстояние от плоскости отсчета до подвижной опоры строго определенное и равно *l*. Затем замеряется реакция подвижной опоры $R_Б$ от суммарного воздействия веса подвижной опоры и изделия. Реакции подвижной опоры от веса изделия будет равна $R_{ИЗД}=R_Б - R_1$.

Положение центра масс изделия относительно торца определяется из условия равновесия моментов действующих сил относительно опоры *А* по следующей формуле:

$$X_{ЦМ} = L + l - \frac{L(R_Б - R_1)}{mg}, \qquad (7.2)$$

где L расстояние между опорами; l расстояние от плоскости отсчета до оси подвижной опоры; $R_Б$ - реакция от веса подвижной опоры и изделия; R_1 - реакция опоры от веса подвижной опоры (P_1); m - общая масса изделия, g - ускорение свободного падания.

При замерах положения центра масс необходимо знать погрешность метода. Для данного стенда на точность замера влияют точность горизонтальной установки базовой оси изделия, результаты взвешивания и параметры стенда.

На рис.7.3 показана схема стенда для определения положения центра масс изделия по трем координатам на одновесовом поворотном стенде. Стенд состоит из круглого основания *4* с рычагом *2*, опирающимся одной точкой *А* на весы *1* и двумя опорами-призмами в неподвижных точках *Б* и *В*. Расстояния между опорами заданы. В основание устанавливается поворотное кольцо *5*, на которое опирается измеряемое изделие *3*. Опоры в точках *Б* и *В* смещены относительно центра стенда на величину *е*.

Для определения смещения центра масс в плане необходимо предварительно взвешенное изделие установить на поворотное кольцо *4* вертикально по РТ с помощью теодолитов, при этом строительные оси его должны совместиться с осями отсчета стенда *X-X* и *Y-Y*. Затем замеряется реакция $R_{1ИЗД}$ на весовой опоре от действия веса изделия при первом положении изделия, когда од-

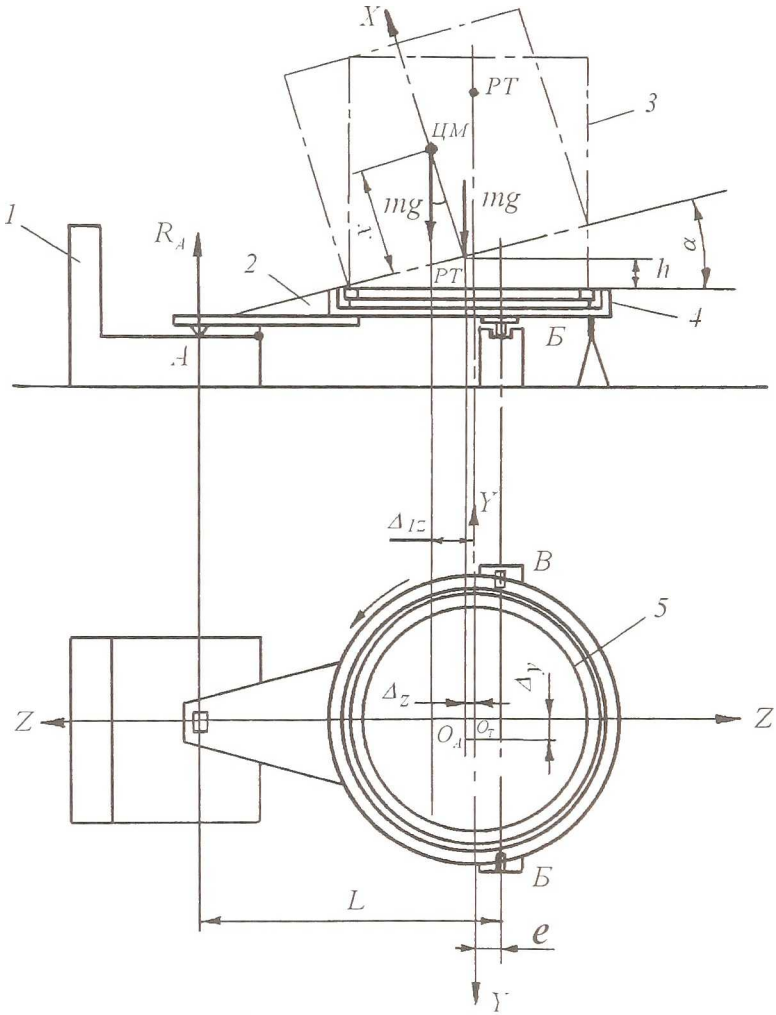


Рис. 7.3. Схема одновесового поворотного стенда

на ось изделия совпадает с осью стенда, проходящей через геометрический центр основания и опору на весах. Далее для расчета смещения центра масс в направлении, перпендикулярном первому, изделие поворачивается вместе с кольцом вокруг вертикальной оси на 90° до совпадения другой строительной оси с базовой осью стенда. В этом втором положении также замеряется реакция от воздействия массы изделия $R_{2ИЗД}$.

Расчет координат центра масс ведется из условия равновесия моментов действующих сил относительно оси, проходящей через опоры в точках *Б* и *В* по следующим формулам:

$$\Delta Z = \frac{\left(R_Z - R_{Z\,ПУСТ}\right)L}{mg} - e; \quad \Delta Y = \frac{\left(R_Y - R_{Y\,ПУСТ}\right)L}{mg} - e, \quad (7.3)$$

где ΔZ координата (смещение) центра масс в направлении Z-Z; R_Z - реакция стенда с изделием по оси Z-Z изделия; $R_{Z\,ПУСТ}$ - реакция стенда по оси Z-Z; L - расстояния между опорами $А$ и $Б$ ($В$) (задается конструктором); m масса изделия; g - ускорение свободного падения; e расстояние от оси изделия до опорных призм (задается конструктором); ΔY координата (смещение) центра масс в направлении Y-Y; R_Y - реакция стенда с изделием по оси Y-Y изделия; $R_{Y\,ПУСТ}$ - реакция стенда по оси Y-Y.

На этом же стенде можно определить положение центра масс изделия и вдоль продольной оси. Для этого необходимо изделие отклонить от вертикального положения на угол α. Аналогично предыдущему расчету можно подсчитать координату центра масс в плане по одному из заданных направлений, например Δ_{IZ}, и замерить превышение центра базового шпангоута h относительно горизонтального положения.

Тогда положение центра масс изделия на продольной оси относительно базового шпангоута можно рассчитать по формуле

$$X = \frac{\Delta_{IZ}}{\sin\alpha} - \frac{h}{\cos\alpha}. \quad (7.4)$$

Погрешность измерения положения центра масс определяется погрешностью взвешивания и погрешностями геометрических размеров (ΔL, Δe), биением поворотного кольца, погрешностями установки изделия на столе стенда. Как показала практика процесса балансировки, общая погрешность составляет $\Delta\varepsilon_{ОБЩ} = 0{,}8$ мм.

Определение смещения центра масс изделия относительно продольной оси и балансировка осуществляются на стенде с шарнирной механической опорой **с двумя рычажными весами** и вертикальным расположением замеряемого изделия. Схема стенда показана на рис.7.4.

Стенд состоит из платформы-основания *2* с переходником *4*, опирающихся на три точки. Шарнирная точка опоры стенда *5* смещена относительно теоретической оси стенда на определенную величину b. Двумя другими опорами служат рычажные весы *3*, расположенные по направлению осей *I-III* и *II-IV*. Расстояния от шарнирной оси стенда $О_{III}$ до точек опор на весы определяются размерами штанг *6* стенда и соответственно осям равны $L_{I\text{-}III}$ и $L_{II\text{-}IV}$. При условии точного выполнения стенда принимается, что реакции

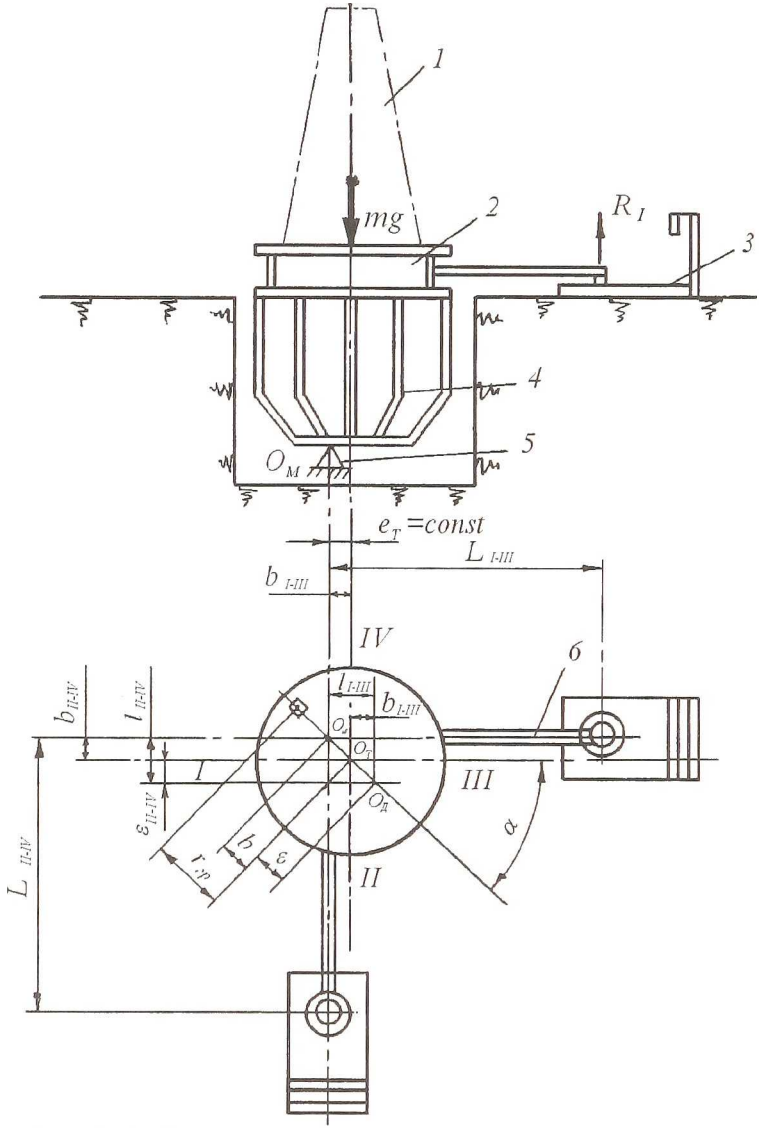


Рис. 7.4. Схема двухвесового балансировочного стенда с механической шарнирной опорой

на весах от веса стенда одинаковы $R_{1\,CT}=R_{2\,CT}$ и ось стенда совпадает с теоретической осью изделия.

Определение смещения центра масс изделия относительно теоретической оси заключается в следующем. Замеряемое изделие *1*, предварительно взвешенное, устанавливается вертикально на горизонтальной платформе, базируется по базовым стыковочным отверс-

тиям фланцевого разъема и базовым отверстиям стенда с помощью классных болтов-фиксаторов, чтобы уменьшить погрешность смещения оси изделия относительно оси стенда при установке. Затем замеряются реакции R_1 и R_2 на весах от веса изделия, приложенного в действительном ($O_Д$) центре изделия.

Смещение центра масс изделия ε определяется расчетным путем, исходя из условия равновесия действующих сил по направлениям осей *I-III* и *II-IV*:

$$\sum M_{O_{III}}^{I-III} = 0; \quad \sum M_{O_{III}}^{II-IV} = 0.$$

Вначале определим составляющую эксцентриситета ε_{I-III} в направлении *I-III*:

$$\sum M_{O_{III}}^{I-III} = mg \cdot l_{I-III} - R_1 \; L_{I-III} = 0.$$

Из этого уравнения находим последовательно:

$$l_{I-III} = \frac{R_1 \; L_{I-III}}{mg},$$

$$\varepsilon_{I-III} = l_{I-III} - b_{I-III} = \frac{R_1 \cdot L_{I-III}}{mg} - b_{I-III}, \qquad (7.5)$$

где l_{I-III} - плечо действующей силы mg относительно шарнирной опоры в направлении *I-III*; b_{I-III} - смещение шарнирной опоры стенда в направлении *I-III* относительно теоретической оси изделия; ε_{I-III} - смещение (эксцентриситет) действительной оси изделия относительно теоретической оси в направлении *I-III*.

Аналогично из уравнения равновесия в направлении *II-IV* найдем вторую составляющую эксцентриситета оси изделия:

$$\sum M_{O_{III}}^{II-IV} = mg \cdot l_{II-IV} - R_2 \; L_{II-IV} = 0,$$

отсюда

$$l_{II-IV} = \frac{R_2 \cdot L_{II-IV}}{mg}, \quad \varepsilon_{II-IV} = l_{II-IV} - b_{II-IV} = \frac{R_2 \cdot L_{II-IV}}{mg} - b_{II-IV}, \quad (7.6)$$

где обозначения соответственно оси *II-IV* аналогичны предыдущим.

Зная ε_{I-III} и ε_{II-IV}, подсчитаем полное смещение:

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_{I-III}^2 + \varepsilon_{II-IV}^2}, \qquad (7.7)$$

где ε - полное смещение центра масс относительно продольной оси.

Направление его определяется углом α, который подсчитывается через

$$tg\alpha = \frac{\varepsilon_{II-IV}}{\varepsilon_{I-III}}$$

Если смещение центра масс ε превышает допустимое значение, то с целью уменьшения смещения производят так называемую балансировку изделия. Она заключается в установке уравновешивающего груза $m_{ГР}$ на направлении смещения в противоположную сторону $O_Д$-O_T в удобном месте на изделии, определяемом расстоянием до теоретической оси $r_{ГР}$.

Масса уравновешивающего груза определяется из уравнения равновесия действующих сил:

$$\sum M_{0TEOP} = 0 \text{ или } mg \cdot \varepsilon - m_{ГР} \cdot g \cdot r_{ГР} = 0,$$

отсюда

$$m_{ГР} = \frac{m \cdot \varepsilon}{r_{ГР}}. \qquad (7.8)$$

Рассмотрим пример балансировки блока И ракеты-носителя "Молния" рис.7.5. Для проведения статической балансировки необходимо следующее [5].

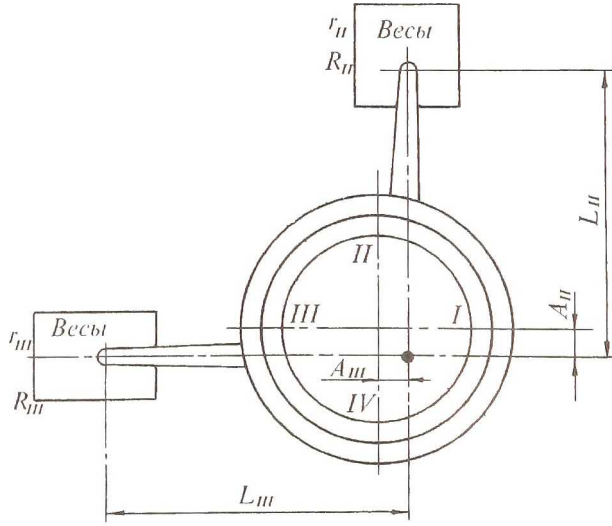


Рис. 7.5. Схема балансировки блока И ракеты-носителя "Молния"

1. Установить на контрольные площадки переходника уровни (брусковые) с ценой деления ≤ 0,05 мм на 1 м.
2. Выставить базовую плоскость переходника горизонтально с помощью домкратов на всех весах с точностью 0,5 деления шкалы уровня.

3. Снять с весов 3 раза показания и определить соответствующие реакции пустого стенда.
4. Найти среднее значение реакции пустого стенда по результатам трех замеров по формуле

$$R_{II} = \frac{R_{II(1)} + R_{II(2)} + R_{II(3)}}{3},\ R_{III} = \frac{R_{III(1)} + R_{III(2)} + R_{III(3)}}{3}.$$

5. Установить на стенд блок И и макет блока.
6. Определить реакции системы "стенд + блок И + макет" в плоскостях II и III.
7. Найти среднее значение реакции системы "стенд + блок И + макет" по результатам трех замеров:

$$R'_{II} = \frac{R'_{II(1)} + R'_{II(2)} + R'_{II(3)}}{3},\quad R'_{III} = \frac{R'_{III(1)} + R'_{III(2)} + R'_{III(3)}}{3}$$

8. Произвести контрольную балансировку системы "блок И + макет" второй раз.
9. Определить эксцентриситет центра масс системы "сборка + макет" в плоскостях I-III и II-IV по формулам

$$\varepsilon_{II+M}^{I-III} = -\left[\frac{(R'_{III} - R_{III})L_{III}}{(m_{II} + m_M)g} - A_{III}\right],\ \varepsilon_{II+M}^{II-IV} = \left[\frac{(R'_{II} - R_{II})L_{II}}{(m_{II} + m_M)g} - A_{II}\right],$$

где m_{II} - масса блока И; m_M - масса макета объекта; g ускорение свободного падения; L_{II}, L_{III} - расстояние от шарнирной опоры стенда до опоры стенда на весах; A_{II}, A_{III} - смещение шарнирной опоры стенда относительно его продольной оси по направлениям I-III, II-IV.

Следует отметить, что если ε^{I-III} получилось со знаком плюс, то центр масс смещен в сторону плоскости I, если со знаком минус, то в сторону плоскости III. Аналогично, если ε^{II-IV} получилось со знаком плюс, то центр масс смещен в сторону плоскости II, если со знаком минус, то в сторону плоскости IV

10. Найти осредненные координаты центра масс системы "сборка + макет":

$$\varepsilon_{II+M}^{I-III} = \frac{\varepsilon_{I-III}^{P} + \varepsilon_{I-III}^{K}}{2},\quad \varepsilon_{II+M}^{II-IV} = \frac{\varepsilon_{II-IV}^{P} + \varepsilon_{II-IV}^{K}}{2}.$$

11. Определить статические моменты центра масс системы "сборка + макет объекта":

$$M_{II+M}^{I-III} = \varepsilon_{II+M}^{I-III} mg,\ M_{II+M}^{II-IV} = \varepsilon_{II+M}^{II-IV} mg,$$

где m - суммарная масса системы "сборка + макет объекта".

12. Определить статические моменты центра масс макета по формулам

$$M_{II+M}^{I-III} = E_{II+M}^{I-III} m_M g,\quad M_{II+M}^{II-IV} = E_{II+M}^{II-IV} m_M g.$$

Значения E_M^{I-III}, E_M^{II-IV}, m_M берутся из паспорта на макет. Величины E_M^{I-III} и E_M^{II-IV} брать со знаком плюс, если центр масс макета смещен в сторону I и II плоскости и со знаком минус, если центр смещен в сторону III и IV плоскости.

13. Определить статические моменты центра масс сборки (блока И) по формуле

$$M_И^{I-III} = M_{И+M}^{I-III} - M_M^{I-III}, \quad M_И^{II-IV} = M_{И+M}^{II-IV} - M_M^{II-IV}$$

Взвешивание и определение координат центра масс изделия можно проводить и на универсальном стенде **с тремя весовыми механизмами**. В конструкции стенда использован принцип взвешивания и центрирования с помощью трех весовых механизмов с заданными расстояниями между точками приложения сил.

Принципиальная компоновочная оптико-кинематическая схема стенда приведена на рис.7.6. На основании стенда *14* устанавливаются три подвижных колонны *21* с весовыми механизмами и одна неподвижная *15*. Платформой для укладки изделия при взвешивании является грузоподъемная рама *19*. Она снабжена тремя точками опоры для взвешивания, две из которых *Б* и *В* ложатся на подушки серег *4* и *12* весовых механизмов *2* и *11*, а третья *А* на подушки поперечной балки *20 (17)*. Последняя, в свою очередь, кернами лежит на серьге *16* неподвижной колонны *15* и серьге *22* весового механизма *1*. Передаточное отношение рычагов весового механизма *1* выбрано так, что есть возможность на его циферблате получить силу реакции, действующей в точке *А* балки *20*, т.е. силу на третьей опоре горизонтальной рамы. Во время укладки изделия рама снимается с грузоподъемных серег и находится в горизонтальном положении на трех опорах механизма подъема.

При взвешивании изделие должно занимать на раме строго определенное горизонтальное положение, при котором ось изделия параллельна продольной оси рамы, являющейся осью отсчета при определении координаты *Y* или *Z*, а линия кернов *БВ* совпадает с плоскостью стыка изделия с подставкой и является базой для отсчета при определении координаты *X* центра масс. Правильность положения изделия относительно принятых базовых осей рамы, являющихся осями отсчета, определяется реперными точками (РТ) изделия, положение которых относительно рамы контролируется зрительными трубками *3, 5, 7, 9* и перископами *8* и *13*. Зрительные трубки контролируют горизонтальное положение изделия, а перископы - его положение вдоль оси рамы.

Изделие укладывается на раме стенда *19* на три опоры *6, 10* и *18*, снабженные механизмами, которые обеспечивают все необходимые его перемещения для совмещения базовых реперных точек с перекрестиями оптических приборов. Точность установки изделия по реперным точкам составляет 0,5 мм. После установки рамы с издели-

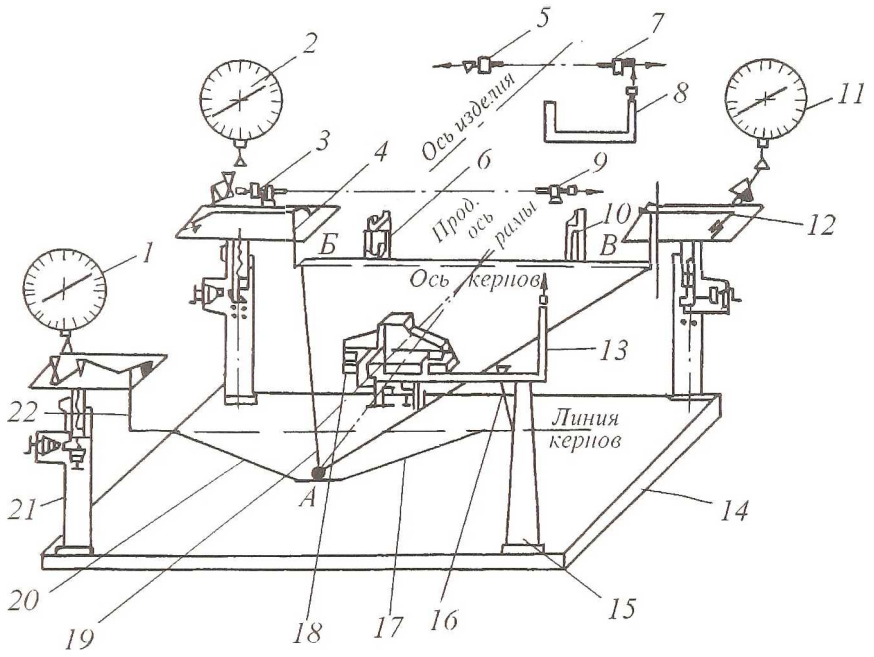


Рис.7.6. Компоновочная оптико-кинематическая схема стенда с тремя весовыми механизмами

ем в горизонтальное положение производится снятие показания на циферблатных головках.

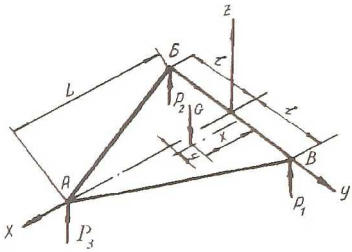


Рис. 7.7. Схема расположения сил на платформе стенда

Масса изделия m определяется как сумма трех показаний весовых механизмов (рис.7.7):

$$m = m_1 + m_2 + m_3,$$

где m_1, m_2, m_3 - масса соответственно по циферблатным указателям механизмов *1*, *2*, *11*.

Координаты X и Y центра масс определяются из уравнений статики:

$$\Sigma M_y = 0, \Sigma M_x = 0;$$

$$X = \frac{m_3 L}{m}; \qquad (7.9)$$

$$Y = \frac{(m_1 - m_2)l}{m}; \qquad (7.10)$$

где L расстояние между линиями кернов БВ и точкой A грузовой рамы (величина постоянная для данного стенда); l расстояние от

продольной оси стенда до точек приложения сил *Б* и *В* на раме (для данного стенда величина постоянная).

Для определения координаты *Z* центра масс изделия последнее поворачивают на 90° вокруг оси и вновь укладывают на грузоподъемную раму. Все операции аналогичны предыдущим. На стенде могут быть проверены изделия, отличающиеся массой, габаритными размерами и положением реперных точек (от 500 до 10000 кг).

На точность определения координат центра масс путем его взвешивания на трех весах влияет точность определения сил реакции и установки изделия на грузоподъемной платформе стенда относительно базовых осей. Суммарная ошибка определения координат ЦМ на стенде $\Delta_{СУМ} = \pm 1{,}5$ мм. Возможными путями повышения точности определения координат центра масс на трехвесовом стенде являются: повышение точности весовых механизмов; уменьшение расстояния между точками опор платформы; установка контролируемых изделий по жестким механически обработанным базам.

Упрощенно этот метод используется при взвешивании и определении положения центра масс самолета с помощью трех весов. Рассмотрим кратко порядок технологического процесса.

1. Подготовка изделия к взвешиванию. Машина взвешивается с полным комплектом оборудования без топлива и масла. Перед взвешиванием изделие полностью расчехляется, тщательно осматривается и очищается от всех посторонних предметов, снимаются крышки с воздухозаборников и выхлопных труб.

2. Взвешивание изделия на рычажных весах (рис.7.8). Перед взвешиванием проверяются рычажные механизмы весов и нулевое положение. Затем самолет накатывается на весы, устанавливается в горизонтальное положение и взвешивается. Общая масса самолета определяется по сумме реакций трех весов, на которые опираются передняя и задние стойки шасси:

$$m_{САМ} = P_1 + P_2 ,$$

где $m_{САМ}$ общая масса машины, кг; P_1 показания весов носового колеса, кг; P_2 - показания весов основных колес, кг.

3. Определение положения центра масс самолета.

Положение центра масс изделия определяется по оси *X* относительно базовой линии, например, оси заднего III лонжерона центроплана. Для определения центра масс необходимо замерить расстояние *А* от оси вращения тележки главных ног шасси до линии оси заднего лонжерона и расстояние *Б* от оси вращения колес передней стойки до базовой линии.

Положение центра масс машины относительно оси заднего лонжерона определяется по формуле

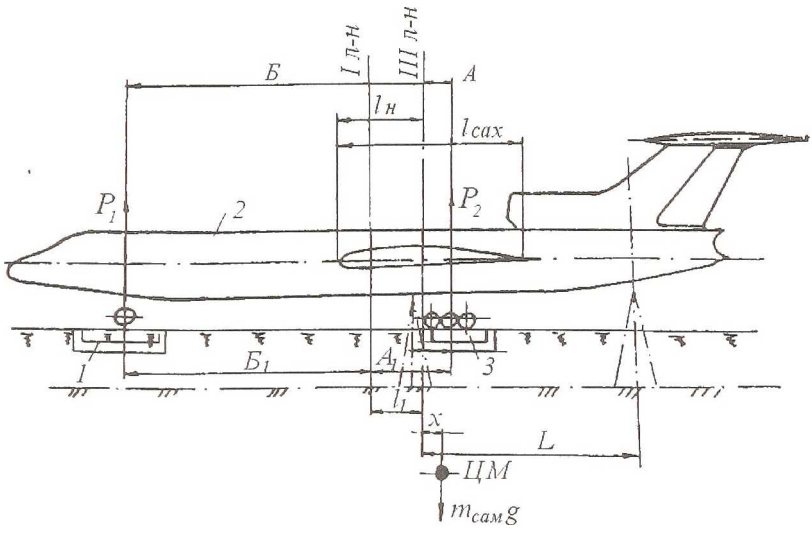


Рис. 7.8. Схема определения центровки самолета:
1,3 - весы, 2 - самолет

$$X = \frac{m_2 А - m_1 Б}{m_{САМ}} . \qquad (7.9)$$

Затем подсчитывается положение центра масс изделия, приведенного к составу эталонной массы (полной массы), относительно оси заднего лонжерона центроплана по формуле

$$X_{ЭТАЛ} = \frac{m_{САМ} X_1 + \sum m_i l_i - \sum m_k l_k}{m_{САМ} + \sum m_i - \sum m_k} , \qquad (7.10)$$

где m_i - массы элементов недостающего оборудования, кг; m_k массы элементов излишнего оборудования, кг; l_i - координаты недостающих элементов относительно оси заднего лонжерона центроплана, мм; l_k - координаты излишних элементов относительно оси заднего лонжерона центроплана, мм.

И, наконец, подсчитывается положение центра масс самолета, приведенного к составу эталонной массы, относительно начала средней аэродинамической хорды по формуле

$$\overline{X} = \frac{X_{ЭТАЛ} + l_H}{l_{САХ}} 100\% ,$$

где $l_{САХ}$ длина средней аэродинамической хорды (САХ); l_H расстояние от носка САХ до базовой линии оси III лонжерона.

В настоящее время разработаны конструкции стендов статической балансировки изделий, основанные на **принципе дисбаланса**, которые могут работать как по неавтоматическому, так и по автоматическому циклу и обеспечивают получение результатов измерений координат центра масс по трем координатам с высокой точностью.

Рассмотрим конструкцию стенда статической балансировки ССБ-7 (Рис.7.9). Стенд предназначен для определения положения центра масс изделия по трем координатным осям.

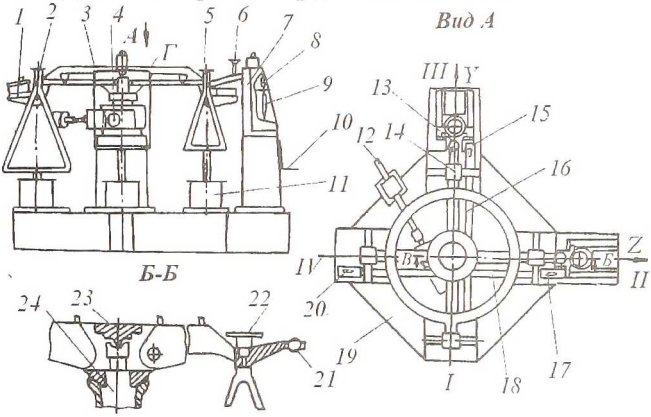


Рис. 7.9. Конструктивная схема стенда статической балансировки ССБ-7

Технические данные.

Максимальная допустимая масса (нагрузка) на стол стенда, кг ...400
Минимальная масса изделия, кг 20
Максимальное смещение центра масс изделия
относительно вертикальной оси, мм 40
Мксимальная погрешность определения горизонтальных
координат *Y, Z* центра масс изделия, мм 0,2
Максимальная погрешность определения вертикальной
координаты *X* центра масс изделия,мм 1,5
Габаритные размеры стенда, мм ..... 1700×1650×1200
Масса стенда, кг 700

Преимущество определение положение центра масс изделия по осям *X*, *Y* и *Z* без перестановки и кантования изделия во время всего процесса центровки. Это повышает точность определения положения ЦМ изделия и исключает изготовление дополнительной оснастки: кантовочного приспособления, ложементов при определении продольной координаты центра масс.

Стол *3* стенда устанавливается на центральную призматическую опору *23*, которая имеет возможность наклоняться во всех направлениях с трением качения. Опора установлена на центральной стойке *24*. Центральный домкрат *4* с приводом *12* может приподнять

стол стенда на 0,5...1,2 мм и разгрузить центральную опору во время установки изделия или переходника на стол стенда. Наклон стола стенда ограничивается зажимами боковых опор *7* и *14*. Поворот стола стенда вокруг вертикальной оси ограничивается упорными винтами боковой опоры *14*. Грузовые площадки *2* и *5* подвешены к столу стенда на призмах *22*, которые позволяют грузовым площадкам качаться во всех направлениях с трением. Под каждой грузовой площадкой расположен демпфирующий бачок *11*, заполненный маслом, в котором передвигается демпфер, прикрепленный винтами к грузовой площадке. К столу стенда шарнирно подвешены штанги *16* и *18*, на которые устанавливаются уровни *20*, *17*, *15*, служащие для контроля горизонтального и наклонного положения стола стенда. Уровень *20* устанавливается на наклонном кронштейне *1*. Центральная стойка, домкрат, боковые опоры и демпфирующие бачки закреплены на сварной раме *19*, которая крепится фундаментными болтами к фундаменту.

Перед началом работы базовая плоскость *Г* стола стенда выводится в горизонтальное положение. При этом должны совпадать изображения концов пузырька ампулы уровней *17* и *15*. Затем стол стенда с помощью боковой опоры *7* и рукоятки *10* наклоняется на угол $\alpha = 8°$. Точность угла наклона стола стенда обеспечивается калибром *9* и индикатором *8*. При этом должны совпадать изображения концов пузырька ампулы уровня *20*. На стол стенда устанавливается переходник и производится его балансировка в горизонтальном и наклонном положении путем установки грузов на верхние плоскости соответствующих грузовых площадок. На стенд устанавливается изделие и производится его балансировка относительно центральной опоры путем установки грузов на нижние плоскости соответствующих грузовых площадок. При этом за состояние равновесия принимается такое положение, когда при совпадении изображений концов пузырька ампулы уровней *17* и *15* стол стенда опирается сферическими опорами *21* на нижние опоры скоб *6* и *13*, а при снятии контрольных грузов с грузовых площадок, расположенных со стороны боковых опор, состояние покоя нарушается и стол стенда выходит из горизонтального положения. По известным значениям плеч, массы балансировочных грузов и массы изделия производится расчет горизонтальных координат Y, Z центра масс изделия.

Для определения вертикальной координаты X центра масс изделия стол стенда наклоняют на угол $\alpha = 8°$ и на верхние плоскости грузовых площадок устанавливают балансировочные гири, полученные при наклонном положении стола с переходником. Правильность угла наклона стола стенда проверяют по уровню *20*, у которого должны совпадать изображения концов пузырька ампулы. Затем производят балансировку изделия в наклонном положении путем

13 Зак. 1682

установки гирь на нижнюю плоскость грузовой площадки *2*. По полученным значениям массы балансировочных гирь и известным значениям массы изделия, длины плеча и тангенса угла наклона стенда определяют путем расчета вертикальную координату X центра масс изделия.

Рассмотрим более подробно процесс определения координат центра масс изделия на стенде ССБ-7. Некоторые эксплуатационные требования при работе на стенде: все контрольные измерения на стенде производятся при температуре 20±10°С; проверка точности балансировки производится контрольными грузами; масса контрольных грузов определяется в зависимости от величины нагрузки на центральную опору стенда. При балансировке пустого стола стенда масса контрольного груза m_{K1} определяется по формуле

$$m_{K1} = \frac{f_{TP} m_{CT}}{L}, \qquad (7.11)$$

где m_{K1} масса контрольного груза (m_{K1} = 0,2 г); f_{TP} коэффициент трения качения (f_{TP} = 0,01 мм); m_{CT} - масса стола стенда (m_{CT} = 100 кг); L - расстояние от оси качения стола стенда до оси подвески грузовых площадок (L = 500 мм) .

При балансировке переходника масса контрольного груза m_{K2} рассчитывается по формуле

$$m_{K2} = \frac{f_{TP}\left(m_{CT} + m_{ПЕР}\right)}{L}, \qquad (7.12)$$

где $m_{ПЕР}$ - масса переходника, кг.

При балансировке изделия масса контрольного груза m_K рассчитывается по формуле

$$m_K = \frac{f_{TP}\left(m_{CT} + m_{ПЕР} + m\right)}{L}, \qquad (7.13)$$

где m - масса изделия, кг.

Порядок определения горизонтальных координат Y, Z центра масс изделий (рис.7.9) следующий.

1. Рассчитать массу контрольных грузов m_K для балансировки изделия по формуле (7.13).
2. Установить на нижние плоскости грузовых площадок II и III, расположенных со стороны боковых опор *14*, контрольные грузы m_K.
3. Вывернуть верхние упоры скоб *6* и *13*.
4. Произвести предварительную балансировку изделия на стенде. Подбирая массу гирь на грузовых площадках, добиться такого

положения, при котором боковые сферические опоры стола стенда будут опираться на нижние опоры скоб *6* и *13*, а при установке грузов массой 100 г на грузовые площадки I и IV боковые сферические опоры стенда самопроизвольно перейдут в крайнее верхнее положение и упрутся в верхние упоры скоб *6* и *13*.

5. Ввернуть верхние упоры скоб *6* и *13*.
6. Проконтролировать горизонтальное положение стола стенда по уровням *17* и *15*. Если изображения концов пузырька ампулы уровней *17* и *15* не совпадают, то необходимо добиться их совпадения путем перемещения скоб *6* и *13* боковых опор.
7. Вывернуть верхние упоры скоб *6* и *13*.
8. Произвести окончательную балансировку изделия на стенде. Подбирая массу гирь на грузовых площадках, добиться такого положения, когда при совпадении изображений концов пузырька ампулы уравней *17* и *15* боковые сферические опоры стола стенда будут опираться на нижние опоры скоб *6* и *13*, а при снятии контрольных грузов с площадок II и III (поз. *14*) состояние равновесия нарушится и боковые сферические опоры стола *21* стенда упрутся в верхние упоры скоб *6* и *13*.
9. Ввернуть верхние упоры скоб *6* и *13*.
10. Зарегистрировать массу гирь m^{I}, m^{II}, m^{III} и m^{IV}, расположенных на соответствующих грузовых площадках (рис.7.10, а).
11. Рассчитать координаты Y, Z центра масс изделия по формулам, полученным из условия равновесия:

$$Y = \frac{\left(m^{I} - m^{III} - m_K\right)L}{m}; \qquad (7.14)$$

$$Z = \frac{\left(m^{II} - m^{IV} + m_K\right)L}{m}, \qquad (7.15)$$

где m масса изделия, кг; L расстояние от оси центральной опоры стенда до оси подвески грузовой площадки, мм (L = 500 мм); m^{I}, m^{II}, m^{III}, m^{IV} масса гирь, расположенных на соответствующих грузовых площадках без учета массы контрольных грузов, кг; m_K - масса контрольных грузов, расположенных на II и III грузовых площадках, кг. Здесь за положительное направление оси Y принято направление по оси I-III стенда. За положительное направление оси Z принято направление по оси II-IV стенда. Не снимая гирь m^{I}, m^{II}, m^{III}, m^{IV}, расположенных на соответствующих грузовых площадках, и контрольных грузов m_K расположенных на II и III грузовых площадках, присту-

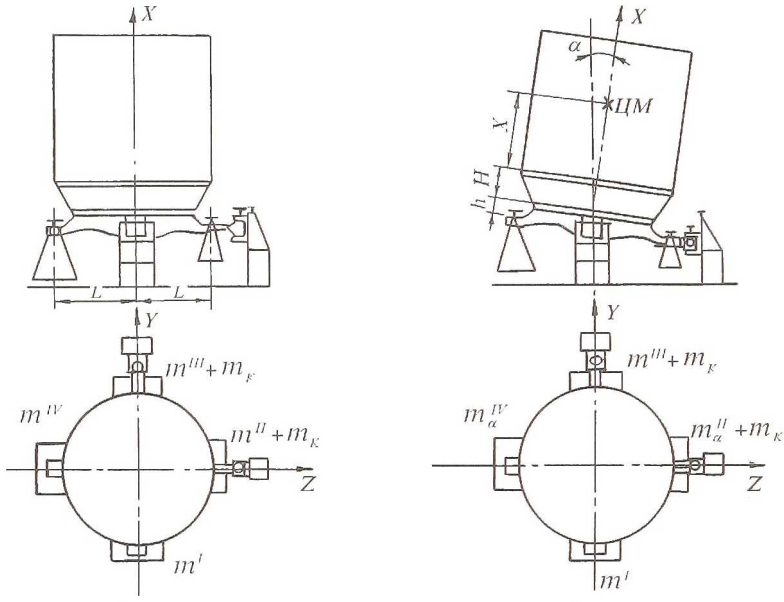


Рис. 7.10. Расчетная схема определения координат *X*, *Y* изделия

пить к определению вертикальной координаты *X* центра масс изделия.

Порядок определения вертикальной координаты центра масс изделий способом наклона.

1. Снять гири m^{II} и m^{IV}, расположенные на верхних плоскостях грузовых площадок II и IV (см. рис.7.10, а).
2. На верхние плоскости грузовых площадок II и IV установить гири m_α^{II} или m_α^{IV}, приводящие систему в равновесие при балансировке стола с переходником в наклонном положении (рис.7.10, б) .
3. Вывернуть верхние упоры скоб *6* и *13* (рис.7.9).
4. Убрать калибр *9* из-под индикатора *8* и наклонить стол стенда на угол $\alpha = 8°$ путем перемещения скобы *6* до того момента, пока измерительный наконечник индикатора *8* не упрется в стойку и стрелки индикатора покажут значение, установленное при горизонтальном положении стола стенда.
5. Произвести предварительную балансировку изделия на стенде при наклонном положении. Путем установки гирь на IV грузовую площадку добиться такого положения, при котором боковая сферическая опора стенда будет опираться на нижнюю опору скобы *6*, а при установке груза массой 100г на грузовую площадку IV боковая сферическая опора стенда самопроизвольно перейдет в крайнее верхнее положение и упрется в верхний упор скобы *6*.
6. Ввернуть верхние упоры *6* и *13*.

7. Проконтролировать наклонное положение стола стенда по уровню *20*. Если изображения концов пузырька ампулы не совпадают, то необходимо добиться их совпадения путем перемещения скобы *6* боковой опоры.
8. Вывернуть верхние упоры скоб *6* и *13*.
9. Произвести окончательную балансировку изделия на стенде в наклонном положении. Подбирая массу гирь на IV грузовой площадке, добиться такого положения, когда при совпадении изображений концов пузырька ампулы уровня *20* боковая сферическая опора стола стенда будет опираться на нижнюю опору скобы *6*, а при снятии контрольного груза m_K с грузовой площадки *11* состояние равновесия нарушится и боковая сферическая опора стола стенда упрется в верхний упор скобы *6*.
10. Ввернуть верхние упоры скоб *6* и *13*.
11. Зафиксировать массу гирь m_α^{IV} (см. рис.7.10, б), расположенных на IV грузовой площадке.
12. Произвести расчет вертикальной координаты X центра масс изделия по формуле

$$X = \frac{\left(m_\alpha^{IV} - m^{IV}\right)L}{m \cdot tg\alpha} - H - h \ ,$$

где X вертикальная координата центра масс изделия, мм; m масса изделия, кг; L расстояние от оси центральной опоры стенда до оси подвески грузовой площадки, мм; $tg\alpha$ тангенс угла наклона стола стенда; m_α^{IV} масса гирь на IV грузовой площадке при наклонном положении стола стенда, кг; m^{IV} - масса гирь на IV грузовой площадке при горизонтальном положении стола стенда, кг; H высота переходника, мм; h расстояние от оси качения верхней призмы центральной опоры стенда до базовой плоскости стола стенда, мм.

Операции определения координат центра масс проводятся 3 раза. По полученным результатам рассчитываются средние арифметические значения координат X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP} ЦМ изделия.

Определение положения центра масс самолетов сравнительно небольшой массы ($m < 10 \cdot 10^3$ кг), имеющих продольную плоскость симметрии, может быть произведено **методом подвески**. Для этого ЛА подвешивают не менее чем в двух точках и определяют положение плоскостей, проходящих через точку подвески и ЦМ. Точка пересечения этих плоскостей с плоскостью симметрии принимается за искомое положение ЦМ. Пренебрегаем отклонением положения ЦМ от плоскости симметрии.

Приспособление может быть выполнено либо в виде жесткой балки с гнездами для попеременного закрепления узла подвески, либо в виде балки с непрерывным перемещением точки подвески. Возможно определение центра масс путем подвески системы ЛА с

приспособлением в одной точке и измерения угла наклона системы в результате подвески дополнительных грузов.

Для определения положения центра масс ЛА или его части применяется приспособление с несколькими фиксированными точками подвески (рис.7.11). Приспособление состоит из серьги *1*, соединенной с кран-балкой, подъемной балки *2*, жестко закрепляющейся на изделии *5*, и нивелировочных линеек *3* и *4*. Балка *2* имеет ряд отверстий, точно закоординированных относительно ее опорных точек; серьга подвески легко переставляется из одного отверстия в другое. Для расчета координат ЦМ системы X_C и Y_C (самолет + центровочная балка) достаточно знать значения двух углов наклона оси ЛА к горизонту и соответствующие координаты двух отверстий подвески (см. рис.7.11). Для контроля правильности нивелировки и увеличения точности расчет ведут не менее чем по двум парам точек подвесок. При этом после определения H применяют различные методы: аналитический расчет координат ЦМ системы с последующим пересчетом положения ЦМ самолета (агрегата), расчет с помощью номограмм [37].

Аналитический расчет ведут по формулам:

$$X_C = \frac{x_j tg\alpha_i - x_i tg\alpha_j}{tg\alpha_i - tg\alpha_j}\ ,\quad Y_C = \frac{x_j - x_i}{tg\alpha_i - tg\alpha_j} + Y_k\ , \qquad (7.16)$$

где x_i, x_j - i-е и j-е положения точки подвески балки; Y_k - расстояние от продольной оси ЛА до линии, на которой расположены точки подвески; α_i, α_j - углы наклона продольной оси самолета к горизонту при подвеске за i-е или j-е отверстия на балке.

Углы α_i, α_j определяются как $\arcsin H/L$, где L расстояние между осями подвески линеек, расположенных либо в плоскости строительной горизонтали фюзеляжа, либо в параллельной ей; H разность отсчетов превышения реперных точек по шкалам линеек, произведенных с помощью нивелира, оптическая ось визирной трубы которого расположена в горизонтальной плоскости.

Технологический процесс центровки ЛА или его части состоит из следующих этапов:

- подготовка оборудования и документации к проведению работы;
- подготовка ЛА и участка в цехе к проведению работы;
- установка центровочного механизма на ЛА;
- регулировка и окончательное крепление центровочного механизма на ЛА;
- взвешивание ЛА;

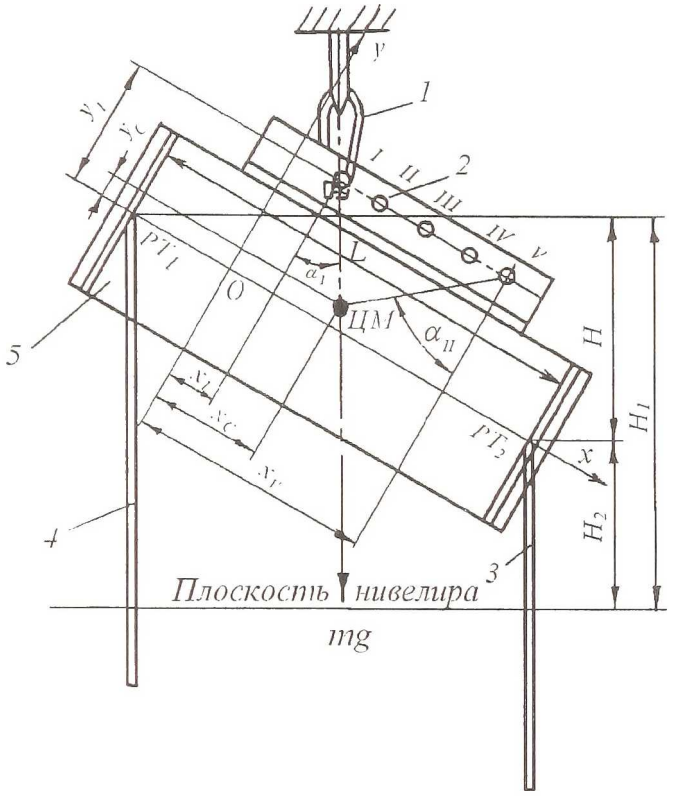


Рис. 7.11. Схема расчета координат центра масс методом подвески

- измерение H_1, H_2;
- расчет координат ЦМ;
- снятие механизма.

Первый и второй этапы характерны для работ по определению ЦМ любым методом. Точность определения координат ЦМ зависит от установки центровочного механизма. Взвешивание ЛА с центровочным механизмом достаточно производить на платформенных весах с погрешностью примерно 0,001 m, где m масса взвешиваемого объекта. Порядок замеров для расчета координат ЦМ следующий.

1. Устанавливают серьгу подвески изделия за одно из отверстий балки. Координаты точки подвески известны.
2. Осторожно поднимают изделие с помощью крана.
3. Транспортируют изделие к участку, огороженному флажками и с установленным нивелиром. После прекращения колебаний изделия измеряют угол его наклона по разности отсчетов по передней и задней линейкам, подвешенным на поясах.

4. Соблюдая меры предосторожности, опускают изделие на ложементы и переставляют серьгу на новое отверстие (см. п. 1).

Для контроля точности измерения угла наклона ЛА производят замеры по двум и трем парам точек подвески.

7.2. Методы измерения массовых моментов инерции (динамическая балансировка)

Управляемость ЛА в полете в значительной мере определяется величиной и точностью размещения масс относительно главных осей вращения. Как известно из механики, моменты сил, обеспечивающие повороты изделия, равны произведению момента инерции тела I на угловое ускорение ε, т. е. $M = I\varepsilon$.

Из формулы видно, что угловое ускорение, сообщаемое телу вращающим моментом, зависит от момента инерции. Моменты инерции относительно различных осей тела необходимо также определять при контроле правильности распределения масс материальных объектов. В особенности это относится к производству ЛА с высокими скоростями полета, к которым предъявляются строгие требования по обеспечению динамической балансировки (распределению масс относительно осей вращения).

Математически момент инерции тела относительно оси, проведенной в теле или вне его, выражается суммой произведений массы m_k, каждой материальной частицы на квадрат расстояния r_k ее от данной оси:

$$I = \sum_{k=1}^{n} m_k r_k^2 \qquad (7.17)$$

Если тело отнесено к прямоугольным координатным осям, то согласно уравнению (7.17)

$$I_x = \sum_{k=1}^{n} m_k \left(Y_k^2 + Z_k^2\right), I_y = \sum_{k=1}^{n} m_k \left(X_k^2 + Z_k^2\right), I_z = \sum_{k=1}^{n} m_k \left(X_k^2 + Y_k^2\right). \quad (7.18)$$

Моменты инерции тела относительно осей всегда положительны.

Под центробежным моментом инерции тела понимают сумму произведений массы каждой материальной частицы твердого тела на две координаты этой частицы в прямоугольной системе осей:

$$I_{y,z} = \sum_{k=1}^{n} m_k Y_k Z_k, \; I_{z,x} = \sum_{k=1}^{n} m_k Z_k X_k, \; I_{x,y} = \sum_{k=1}^{n} m_k X_k Y_k. \qquad (7.19)$$

Центробежные моменты инерции (ЦМИ) могут быть положительными, отрицательными и равняться нулю. ЦМИ имеют значение при динамическом уравновешивании вращающихся тел. Статическое уравновешивание требует, чтобы центр масс лежал на оси вращения. Динамическое уравновешивание требует дополнительно, чтобы при вращении тела центробежные силы сводились только к главному вектору. Знание центробежных моментов инерции необходимо для анализа движения тела со многими степенями свободы, к которым относится ЛА и, в частности, для нахождения так называемых главных осей инерции. Если центробежный момент инерции тела относительно оси вращения равен нулю, то и главный момент центробежных сил инерции равен нулю.

Всякую ось, при вращении около которой тела главный момент центробежных сил инерции равен нулю, называют главной осью инерции тела. Через каждую точку пространства можно провести три главные оси инерции данного тела. Главные оси взаимно перпендикулярны. В этой системе осей центробежные моменты инерции тела равны нулю.

Моменты инерции тела относительно главных осей называют главными моментами инерции. Главные оси инерции, проходящие через центр масс тела, называют главными центральными осями инерции тела. Моменты инерции тела относительно главных центральных осей инерции называют главными центральными моментами инерции тела, они имеют минимальное значение.

Динамическая балансировка ЛА заключается в определении центробежных моментов инерции изделия и положения главных центральных осей инерции относительно конструктивных с последующей ее корректировкой или без нее. Динамическая балансировка проводится после точной статической балансировки. Устранение дисбаланса связано с установкой внутрь ЛА уравновешивающих грузов или временным демонтажом некоторых узлов.

В отличие от статической балансировки грузы крепятся не на одном шпангоуте, а на двух во взаимно противоположных точках, расположенных на некотором расстоянии H вдоль продольной оси.

При динамической балансировке определяют массу грузов, которая должна зависеть от начального разбаланса и от положения их установки по радиусу и расстоянию H между ними по продольной оси изделия.

Динамическая балансировка это сложный технологический процесс. Обороты изделия при балансировке должны быть близкими к эксплуатационным. Допуски на динамическую неуравновешенность ЛА должны основываться на расчетах, учитывающих характер полета и класс ЛА: траекторию и стабилизацию, жесткость, габаритные размеры, параметры двигательной установки и инерционные

характеристики изделия. Технология изготовления ЛА должна учитывать и обеспечивать требования по уравновешиванию. Допуски на отклонение положения главных центральных осей расчетного положения должны быть (0,1- 0,3)° для небольших изделий (масса до 10^3 кг) и (2...4)° для крупногабаритных изделий. Значительное отклонение положения главных центральных осей от расчетного приводит к ухудшению летных характеристик, усложняет систему ориентации, увеличивает массу и мощность двигательной установки.

Определение моментов инерции собранных изделий осуществляется опытным путем на специальных стендах различными методами [23]. Рассмотрим только два наиболее распространенных: метод наблюдения ускорения падающего груза, приводящего во вращательное движение проверяемое изделие (метод падающих грузов); метод свободных крутильных колебаний изделия.

Первый метод применяется для тяжелых изделий, второй для легких.

Метод наблюдения ускорения **падающего груза** осуществляется на специальном стенде. Он обеспечивает вращательное движение контролируемого изделия и замер тангенциальных ускорений. Момент инерции изделия определяется последующим расчетом. Этот расчет основан на решении общего уравнения движения изделия (тела) Как известно, согласно принципу Деламбера внешние силы, в нашем случае силы веса двух грузов $2\ P_{ГР}$, реакции связи (сила трения в подшипниках платформы) и внутренние силы инерции всех материальных частиц изделия, вращающихся частей стенда, подвижных частей кареток и блоков (роликов) уравновешиваются.

Дифференциальное уравнение вращательного движения твердого тела вокруг неподвижной оси имеет вид

$$I_x \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \sum M_x\left(\overline{F}\right), \qquad (7.20)$$

где I_x - момент инерции вращающегося тела относительно оси; $\frac{d^2\varphi}{dt^2}$ угловое ускорение вращающегося тела; $\sum M_x\left(\overline{F}\right)$ сумма моментов всех действующих сил относительно оси X.

Уравнение (7.20) можно записать так:

$$I_x \frac{d^2\varphi}{dt^2} - \sum M_x\left(\overline{F}\right) = 0\ . \qquad (7.21)$$

Приводя крутящие моменты и моменты сопротивления к оси вращения, получим

$$2P_{ГР}\,R - I\frac{d^2\varphi}{dt^2} - 2\frac{P_{ГР}}{g}R^2\frac{d^2\varphi}{dt^2} - 2\frac{P_K}{g}R^2\frac{d^2\varphi}{dt^2} - M_{ТР} = 0\ , \quad (7.22)$$

где $P_{ГР}$ - вес одного приводного груза; R плечо пары, образованной грузами; I момент инерции системы "объект + переходник + платформа"; P_K вес каретки датчика линейных перемещений; $\frac{d^2\varphi}{dt^2}$ угловое ускорение вращающегося изделия; $M_{ТР}$ - момент сопротивления, включающий в себя трение в опорах, блоках, инерцию блоков, сопротивление кареток и т.д.

Заменив в уравнении (7.22) $\frac{d^2\varphi}{dt^2}$ на $\frac{W_\tau}{R}$, определим из него момент инерции системы:

$$I = \frac{2P_{ГР}\,R^2 - M_{ТР}R}{W_\tau} - \frac{2R^2}{g}\left(P_{ГР} + P_K\right), \quad (7.23)$$

где W_τ тангенциальное ускорение изделия или ускорение груза, замеренное датчиком линейных перемещений.

Так как момент инерции системы I включает в себя моменты инерции изделия $I_{ИЗД}$, переходника $I_{ПЕРЕХ}$ и платформы $I_{ПЛАТФ}$, то момент инерции изделия относительно оси X определяется так:

$$I_{ИЗД} = I\ \ (I_{ПЕРЕХ} + I_{ПЛАТФ})\ . \quad (7.24)$$

$I_{ПЕРЕХ}$ и $I_{ПЛАТФ}$ могут быть замерены заранее по аналогичной методике.

Рассмотрим конструкцию и работу стенда для измерения моментов инерции.

Техническая характеристика стенда СИМИ-1.

Масса изделия, кг ..... 2000÷30000
Тип датчика перемещений груза ..... ДПЛ-10, фотоэлектрический
Погрешность отсчета перемещения, % 1,5
Наибольшая скорость перемещения груза, м/с 0,2
Максимальный угол поворота изделия, ° 90
Максимальный крутящий момент от груза, кН·м 3
Диаметр платформы, м 3
Максимальная погрешность определения моментов инерции, %..... 1.

Общий вид стенда представлен на рис.7.12. Поворотная платформа *13* служит для установки изделия *15* с переходником *14* и вращения его относительно оси, совмещенной с вертикальной осью вращения стенда. Вращение платформы осуществляется с помощью двух

падающих грузов *3*, которые через приводной канат *6* и систему роликов *8* соединены с многоступенчатым шкивом *12*. Платформа опирается на вертикальную стойку *19* с поворотной колонной. Для подвода масла к упорному *21* и вертикальным *20* подшипникам на стенде имеется насосная станция *1* с гидросистемой *2*. Для привода колонны *19* и возврата платформы в исходное положение имеются двигатели *9* и *11*, расположенные на литой колонне *10*. В конце рабочего хода грузы опускаются на гидроопоры *4*. Для замера линейных ускорений на стенде имеется датчик линейных перемещений *5* - ДПЛ-10 с цифровой трехзначной системой регистрации перемещений (ЦТСРП). Кроме того, для обеспечения нормальной работы стенда имеются системы электрооборудования, пневмосистема и тормозная.

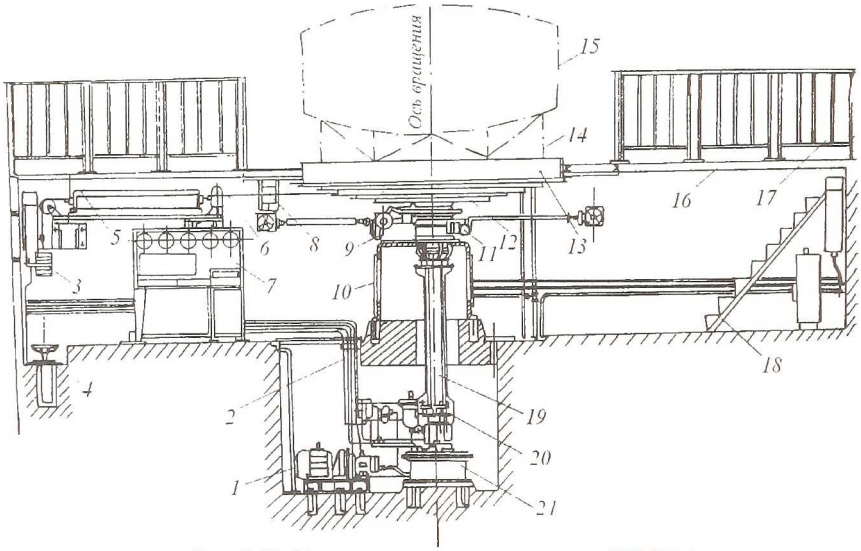


Рис. 7.12. Конструктивная схема стенда СИМИ-1

Управление работой стенда и контроль параметров отдельных систем осуществляется с помощью пульта управления *7*. С целью удобства монтажа и эксплуатации стенда он располагается в углублении ниже уровня пола цеха. Для этого же, а также для обеспечения удобства и безопасности работ при установке измеряемого изделия применяется комплекс оргоснастки: настилы *16*, ограждения *17*, стремянки *18* и пр. Пульт управления предназначен для управления всей работой стенда и представляет собой рабочий стол с установленными на нем вертикальной приборной панелью и наклонной панелью управления. На приборную панель выведены манометры, показывающие давление в полости всасывания, в гидроопорах, под опорой, давление управляющего воздуха.

В электрооборудование СИМИ-1 входят: электросхемы пульта управления, шкаф питания, соединительные кабели и исполнительные механизмы. В нерабочем положении грузы должны быть опущены на гидротормоза. После установки изделия на платформу и включения стенд готов к проведению измерения.

Измерение производится в следующем порядке. При нажатии на кнопку "Рабочий ход" включается реле. После включения реле включится электропневмоклапан и выведет фиксатор из зацепления с платформой, в результате чего платформа освободится от кинематической связи. Платформа под действием грузов приходит во вращение, в результате чего каретка считывает импульсы и подает их на ЦТСРП. В конце рабочего хода грузы опускаются на цилиндры гидросистемы и платформа затормаживается. Измерение окончено. Для проведения нового измерения необходимо вновь вернуть стенд в исходное рабочее положение.

Относительная погрешность определения моментов инерции по методу наблюдения падающего груза составляет примерно 0,4%.

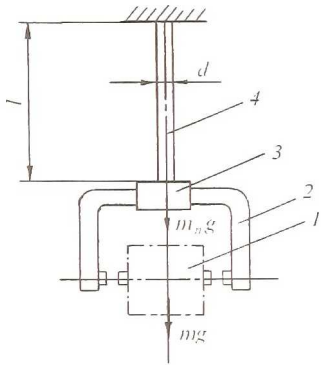


Рис. 7.13. Схема унифилярного подвеса:

1 изделие; 2 приспособление ориентирующееся; 3 - подшипники; 4 - упругий стержень

Определение осевых и центробежных моментов инерции может осуществляться и методом унифилярного подвеса. Унифиляром называется система, состоящая из упругого стержня и укрепленного на его конце тела, совершающего **крутильные колебания** вокруг оси, совпадающей с осью стержня (рис.7.13). Метод унифилярного подвеса является достаточно точным. Для исключения боковых колебаний необходимо, чтобы ось стержня была главной и центральной осью инерции всей системы.

Дифференциальное уравнение движения системы имеет следующий вид:

$$\left(I + I_{\Pi} + I_{\Pi PИB}\right)\frac{d^2\varphi}{dt^2} + M = 0 \ , \qquad (7.25)$$

где M восстанавливающий момент, определяемый упругостью материала стержня; I момент инерции испытываемого тела; I_{Π} момент инерции переходника (приспособления); $I_{ПРИВ}$ приведенный момент инерции стержня, который учитывает влияние массы стержня и распределение ее по длине.

При малых углах закручивания $M = -c\varphi$.

Принебрегая вследствие малости приведенным моментом инерции стержня, можно записать дифференциальное уравнение движения в более простом виде:

$$\left(I+I_{П}\right)\frac{d^2\varphi}{dt^2}-c\varphi=0\ . \qquad (7.26)$$

В силу упругого гистерезиса $f=f_0=\text{const}$. Частота колебаний

$$k=\sqrt{\frac{c}{I+I_{П}}}$$

Период колебания системы относительно измеряемой оси

$$T=\frac{2\pi}{k}=2\pi\sqrt{\frac{I+I_{П}}{c}}\ , \qquad (7.27)$$

отсюда для колебательной системы

$$I+I_{П}=\frac{c}{4\pi^2}T^2\ . \qquad (7.28)$$

Жесткость стального стержня при кручении определяется по формуле $c=GI_P/l$, где G - модуль упругости при сдвиге; I_P - полярный момент инерции стержня, $I_P=\pi d^4/32$; l длина стержня; d диаметр стержня.

Осевой момент инерции одного приспособления (без изделия)

$$I_{П}=\frac{c}{4\pi^2}T_1^2\ , \qquad (7.29)$$

где T_1 период колебания приспособления без изделия относительно измеряемой оси.

Для тарировки стенда применяют специальные эталоны изделий, имитирующие размеры и массу изделия.

Момент инерции эталона определяется из уравнения (7.28):

$$I_{Э}=\frac{c}{4\pi^2}T_2^2-I_{П}\ , \qquad (7.30)$$

где T_2 период колебания приспособления вместе с эталоном относительно измеряемой оси.

Момент инерции изделия относительно оси определяется по формуле

$$I=\frac{c}{4\pi^2}T_3^2-I_{П}\ , \qquad (7.31)$$

где T_3 период колебания приспособления вместе с изделием относительно измеряемой оси.

Из уравнений (7.29) и (7.30) находим момент инерции приспособления:

$$I_П = I_Э \frac{T_1^2}{T_2^2 - T_1^2} \qquad (7.32)$$

Подставляя значение $I_П$ (7.32) в (7.31), получим формулу для определения осевых моментов инерции через известный момент инерции эталона $I_Э$:

$$I = I_Э \frac{T_3^2 - T_1^2}{T_2^2 - T_1^2} . \qquad (7.33)$$

Эта формула удобна для расчетов при использовании экспериментального метода.

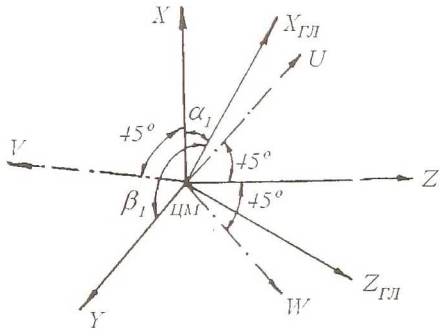


Рис. 7.14. Система координат тела для определения главных моментов инерции

Для определения центробежных, а затем и главных моментов инерции необходимо определить осевые моменты инерции относительно шести осей координат (рис.7.14). Вначале определяются три момента инерции I_x, I_y, I_z, изделия относительно взаимно перпендикулярных осей и три момента инерции I_u, I_v, I_w изделия относительно трех биссектрис, составляемых положительными направлениями этих осей. При таком выборе осей координат центробежные моменты инерции выразятся простыми формулами:

$$I_{xy} = \frac{I_x + I_y}{2} - I_v ; \; I_{xz} = \frac{I_x + I_z}{2} - I_u ; \; I_{yz} = \frac{I_y + I_z}{2} - I_w . \qquad (7.34)$$

Зная моменты инерции и центробежные моменты инерции относительно координатных осей, можно вычислить главные моменты инерции. Три главных момента инерции $I_{гл1}$, $I_{гл2}$ и $I_{гл3}$ получаются из уравнения

$$\begin{vmatrix} I_x - I_{гл} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_y - I_{гл} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_z - I_{гл} \end{vmatrix} = 0 . \qquad (7.35)$$

Для определения главных направлений, т. е. для определения направляющих косинусов каждой из главных осей эллипсоида инерции, надо решить систему трех уравнений первого порядка относительно этих косинусов ($к$ = 1, 2, 3):

$$\left(I_x - I_{гл k}\right)\cos\alpha_{гл k} - I_{xy}\cos\beta_{гл k} - I_{xz}\cos\gamma_{гл k} = 0;$$

$$I_{xy}\cos\alpha_{гл k} + \left(I_y - I_{гл k}\right)\cos\beta_{гл k} - I_{yz}\cos\gamma_{гл k} = 0; \qquad (7.36)$$

$$I_{xz}\cos\alpha_{гл k} - I_{yz}\cos\beta_{гл k} + \left(I_z - I_{гл k}\right)\cos\gamma_{гл k} = 0.$$

Экспериментальное определение моментов инерции изделий методом унифилярной подвески в производстве осуществляется с помощью стенда СИМИ-6. Конструкция стенда СИМИ-6 показана на рис.7.15.

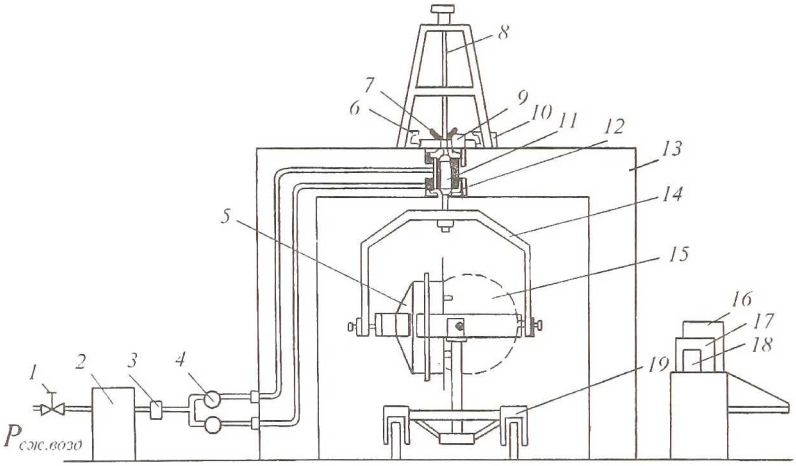


Рис. 7.15. Схема стенда измерения моментов инерции СИМИ-6

Технические характеристики стенда.

Грузоподъемность, кг 500
Тип подшипника ..... аэростатический
Давление сжатого воздуха, Па ..... $4 \cdot 10^5$
Угол закрутки подвеса, ° ..... ±15
Период колебаний, с ..... 3÷10
Точность измерения колебания, с 0,0001
Предельная относительная погрешность определения осевых моментов инерции, % ..... не более 0,2
Потребляемая мощность, кВт 0,2
Габаритные размеры, мм ..... 4000 x 3000 x 4500

На каркас стенда *13* установлен торсионный унифилярный подвес *8*, предназначенный для создания восстанавливающего момента свободных крутильных колебаний. Подвес представляет собой калиброванную стальную проволоку 30ХГСА диаметром от 3 до

8 мм. Ось подвеса направляется аэростатическим радиальным подшипником *11*. Это позволяет производить измерение осевых моментов инерции несбалансированных (статически или динамически) тел и избегать маятниковых колебаний подвеса. В узле подшипника имеется пневматический цилиндр *12*, предназначенный для фиксации оси подшипника в период установки и снятия изделия. К нижней части оси подшипника крепится приспособление - коромысло *14*, в котором устанавливается корсет *5* с изделием *15*. Конструкция коромысла *14* позволяет фиксировать корсет в любом угловом положении относительно одной из осей корсета. Транспортировка корсета с изделием или эталоном и установка его в коромысле осуществляется с помощью тележки *19*. Закрутка торсионного подвеса производится вручную. Ограничение осуществляется с помощью рычага поворота платформы *7* и магнитов *9*. Магниты установлены неподвижно на каркасе стенда. Рычаг может фиксироваться в различных угловых положениях от 0 до 15° Измерение периода колебаний осуществляется оптическим датчиком *6* и шторкой, установленными на верхней части оси подшипника. В оптическом датчике для замера амплитуды колебаний имеется фотодиод *10*, который освещается с помощью специальной оптической системы при определенном положении шторки. Электронная схема, в которую включается фотодиод, осуществляет запуск и выключение частотомера *16*. Включение регистрирующей системы производится на пульте управления *17*. Работа стенда обеспечивается специальным электрическим оборудованием и пневматической системой. В электрооборудование входят: пульт управления стендом, кабельная сеть, панель управления электромагнитами, частотомер *18*, обеспечивающий отсчет времени периода или суммы периодов колебания платформы системы. Отсчет полупериодов колебания платформы системы производится оптическим датчиком.

Пневматическая система стенда состоит из крана *1*, отстойника *2*, фильтра *3*, регуляторов давлений *4* и служит для очистки воздуха, подвода к аэростатическому подшипнику *11* и для управления пневмоцилиндром *12*.

Перейдем к рассмотрению процесса измерения осевых моментов инерции на стенде СИМИ-6. Перед началом измерений изделие должно быть взвешено (G) и определены координаты центра масс ($X_{ЦМ}$, $Y_{ЦМ}$, $Z_{ЦМ}$). Методика измерения осевых моментов инерции заключается в следующем.

1. Изделие устанавливается в корсет, базируется по контрольной плоскости и закрепляется.
2. Подготавливаются и включаются пневмо- и электросистемы.
3. Изделие устанавливается в стенд.
4. Приспособление с изделием поворачивается относительно центра масс системы до совпадения положения оси (X, Y, Z, V, U, W)

изделия, относительно которой измеряется момент инерции, с осью унифилярного подвеса.

5. Отключается механизм фиксации от аэростатического подшипника.
6. Производится закрутка унифилярного подвеса до соприкосновения подушечек платформы с узлами захвата.
7. Тумблером на пульте снимается напряжение с электромагнитов узлов захвата. Унифилярная подвеска начинает совершать свободные крутильные колебания под действием упругих сил стержня.
8. После того как платформа совершит два полных колебания, включается пульт управления электрическим частотомером. Периодически через каждые полупериоды производится засветка фотодиодов в датчиках щелевого типа и сигнал поступает на электрический частотомер и цифровое табло.
9. В соответствии с выбранным режимом начинается контроль числа переходов колебаний изделия и замер времени 10 колебаний приспособления с изделием относительно заданного положения оси изделия.
10. По окончании последнего колебания счет времени прекращается и с табло электрочастотомера снимаются данные по числу колебаний и времени колебаний.

По данным замеров производится вычисление периода колебания приспособления с изделием относительно измеряемой оси по формуле

$$T_3 = \frac{\sum_{1}^{n} t_3}{jn}, \qquad (7.37)$$

где t_3 — время 10 колебаний; n — число измерений ($n = 3$); j — число колебаний при одном измерении ($j = 50$).

Заранее на этапе тарировки стенда определяются необходимые исходные данные T_1, T_2, $I_Э$ и погрешность измерения на стенде δI.

11. По полученным исходным данным вычисляется осевой момент инерции только одного изделия относительно измеряемого положения оси по формуле

$$I = I_Э \frac{T_3^2 - T_1^2}{T_2^2 - T_1^2} + \delta I \qquad (7.38)$$

После определения осевых моментов инерции изделия по шести осям I_x, I_y, I_z, I_v, I_u, I_w производится расчет центробежных моментов инерции, а также расчет главных моментов инерции и определение положения главных осей инерции.

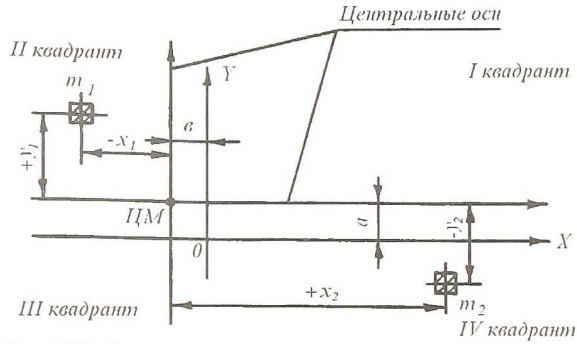


Рис. 7.16. Расчетная схема динамической балансировки в плоскости OXY

Как показывают данные ряда исследований [23,55] и практические данные, метод унифиляра позволяет определять моменты инерции изделий с точностью до 0,05-0,25%.

В заключение рассмотрим пример динамической балансировки изделия, расчетная схема которого приведена на рис.7.16.

Условия для проведения динамической балансировки

$$I_{ЦБ} + \Delta I_{ЦБ} > I_{ЦБДОП}\,, \qquad (7.39)$$

где $I_{ЦБ}$ - полученное значение центробежного момента инерции в результате измерения изделия на стенде; $\Delta I_{ЦБ}$ - ошибка определения на стенде; $\Delta I_{ЦБДОП}$ допускаемое значение центробежного момента инерции изделия.

При выборе места для балансировочных грузов предполагается, что значение I_{xy} имеет отклонение от допуска (причем $I_{xy}>0$). Для уменьшения имеющегося дисбаланса мы должны установить грузы, которые создавали бы такой же центробежный момент инерции (I'), но с обратным знаком: $I'_{xy} = I_{xy}$,где I_{xy} центробежный момент инерции изделия, измеренный на стенде; I'_{xy} центробежный момент инерции изделия, созданный балансировочными грузами.

Так как $I_{xy} > 0$, то $I'_{xy} < 0$ и балансировочные грузы должны находиться во II и IV квадрантах. На схеме (рис.7.16) X и Y обозначают направление строительных осей изделия; a и b координаты центра масс в плоскости XY (XOY). Исходя из конструктивной компоновки, выбирают места установки балансировочных грузов. Координаты их будут относительно центральных осей -, Y_1, X_2, $-Y_2$.

Отметим, что определение и расчет всех моментов инерции производятся относительно центральных осей.

8. КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Высокие скорости полета ЛА при условии обеспечения устойчивости и управляемости предопределяют особые требования к точности изготовления как отдельных агрегатов, так и всего изделия в целом.

Известно, что отклонения геометрических параметров изделий от теоретически рассчитанных значений очень сильно влияют на надежность и качество выполнения стоящей перед ЛА задачи. Всякое отклонение любого параметра от номинального значения вызывает нежелательные отклонения ЛА от теоретически рассчитанной траектории, что в свою очередь вызывает такие последствия: снижение надежности выполнения ЛА стоящей перед ним задачи; увеличение расхода топлива на корректировку траектории.

Современная технология изготовления ЛА не может обеспечить изготовление изделий в точном соответствии с теоретическими расчетами и чертежами. Реальное изделие всегда имеет какие-то параметры, отличные от номинальных. Надежный и объективный контроль на всех технологических этапах изготовления ЛА является необходимым условием для обеспечения качества и взаимозаменяемости. Для определения действительной точности отдельных агрегатов и всего изделия в производстве ЛА широко применяются разнообразные процессы контроля геометрических параметров [22, 27, 32, 51].

Методы и средства контроля зависят от требований точности, формы агрегата, вида узлов разъема (стыка), а также от размеров изделий. Точность размеров, формы и расположения агрегатов (секций) берется относительно теоретических осей или главных конструкторских баз изделия [26].

Главные конструкторские базы изделия (ЛА) это оси прямоугольной системы, состоящие из теоретической продольной оси и двух взаимно перпендикулярных поперечных осей. Эти оси обычно воспроизводятся с заданной точностью реперными знаками (точками) в виде следов или отверстий на наружной поверхности изделия в базовых и контролируемых сечениях.

Прежде чем перейти к рассмотрению сущности методов обмера, ознакомимся с необходимыми принятыми определениями.

Теоретическая ось изделия это продольная ось симметрии теоретического изделия.

Базовая продольная ось изделия это прямая, условно воспроизводящая теоретическую ось изделия и являющаяся базой для монтажа и контроля. За базовую продольную ось изделия принимается прямая, соединяющая геометрические центры двух базовых сечений.

Действительная продольная ось — пространственная кривая линия, соединяющая геометрические центры контролируемых сечений изделия.

Базовые сечения — поперечные сечения изделия, геометрические центры которых определяют положение базовой продольной оси.

Контролируемые сечения — поперечные сечения изделия, геометрические центры которых определяют действительную ось. Центры сечений определяются по наружному диаметру изделия как среднее расстояние между диаметрами противоположных точек или с помощью реперных знаков.

Непрямолинейность действительной оси — это отклонение действительной оси от базовой в заданном контролируемом сечении.

Основными геометрическими параметрами агрегатов ЛА с фланцевым стыковым узлом являются — длина агрегата L, высота H, диаметр агрегата D, точность контура (обвода) агрегата, плоскостность стыка, горизонтальность или вертикальность стыка (параллельность), точность контура в месте стыка, расположение стыковочных отверстий, эксцентриситет стыковых узлов, закрутка стыковых узлов и др.

Контроль крупногабаритных нежестких узлов и агрегатов осуществляется в сборочных или контрольных стапелях-стендах. Узлы и агрегаты представляют собой тела вращения цилиндрической или конической формы, ограниченные плоскостями разъемов, по которым производится сопряжение стыкуемых узлов.

По положению агрегатов в стапеле последние делятся на горизонтальные и вертикальные, что соответственно и определяет схемы и методы измерения.

Основными узлами контрольных стапелей (стендов) являются параллельные плиты, расположенные в вертикальной или горизонтальной плоскостях. Плиты могут быть стационарные, подвижные и поворотные. Они служат для пристыковки агрегата по плоскостям разъемов и ориентации его оси относительно конструктивных баз стапеля.

Рассмотрим методы и средства контроля агрегатов (изделий) с вертикальным расположением оси.

При вертикальном расположении изделия необходимо контролировать следующие геометрические параметры:

- неплоскостность верхнего сечения агрегата;
- непараллельность плоскостей верхнего и нижнего сечений агрегата;
- эксцентриситет геометрического центра верхнего сечения агрегата относительно геометрического центра нижнего сечения при закрепленном неподвижно базовом сечении;

- закрутка по углу верхнего и нижнего сечений агрегата друг к другу.

За базовую плоскость принимается плоскость нижнего торцевого шпангоута агрегата. Базовой продольной осью изделия является перпендикуляр, восстановленный из геометрического центра окружности расположения центров стыковочных отверстий шпангоута, принятого за базу. При контроле секций и агрегатов верхний шпангоут освобождается от базирующих шпилек и болтов и стоит на базовой плоскости с закрепленным нижним шпангоутом, имитирующим стыковку агрегатов. Сборочные (контрольные) стапели или специальные контрольные стенды должны удовлетворять определенным требованиям:

- установка базовой плоскости стапеля в горизонтальное положение должна быть с погрешностью не более ±0,5 мм;
- возможность свободного просмотра агрегата или секции по поперечным строительным плоскостям и по плоскости базового шпангоута;
- возможность размещения оператора на уровне верхнего сечения агрегата и передвижения его вокруг верхнего шпангоута для монтажа оснастки;
- наличие реперных знаков в определенных поперечных строительных плоскостях;
- непараллельность верхней плиты относительно нижней базовой плоскости не должна превышать ±0,5 мм;
- погрешность центрирования изделия на поворотном столе не должна превышать ±0,2 мм.

8.1. Методы определения неплоскостности и непараллельности привалочных плоскостей агрегата

Рассмотрим условия и средства контроля плоскостности и точности расположения привалочных (торцевых стыковочных) плоскостей агрегатов при различном номинальном положении (горизонтальном или вертикальном).

При сборке крупногабаритных изделий предпочтительнее горизонтальное расположение стыковочных и базовых поверхностей поперечных стыков. При этом конструкция меньше подвержена влиянию деформаций под действием собственной массы. В зависимости от размеров изделия применяются следующие способы измерения превышения точек плоскости: для диаметров свыше 5 метров - с помощью гидростатического уровня, нивелира и отвеса со шкалой; для диаметров меньше 5 метров - от материальной базы стенда.

Наиболее точным является метод измерения положения точек поверхности с помощью гидростатического уровня УГС-1. При надлежащей юстировке гидростатический уровень позволяет оценить превышение одной точки над другой не ниже 0,01 мм.

Превышение точек измерительной плоскости определяется разностью глубин жидкости в двух измерительных головках.

Перед операцией контроля гидростатический уровень подготавливается к работе: собираются измерительные головки, соединяются водяными и воздушными шлангами. Вся водяная система заполняется чистой водой, удаляются воздушные пузыри и пробки в плоскостях шпангов. Затем одна измерительная головка устанавливается на плоскости верхнего шпангоута неподвижно, а вторая головка переставляется по проверяемой поверхности и последовательно устанавливается в местах, по которым производится измерение неплоскостности и непараллельности. При каждой установке измеряется глубина уровня воды одновременно в двух измерительных головках, и по разности глубин показаний неподвижной и переставляемой головок определяется положение каждого места установки подвижной измерительной головки относительно горизонтальной плоскости, расположенной на уровне установки неподвижной измерительной головки.

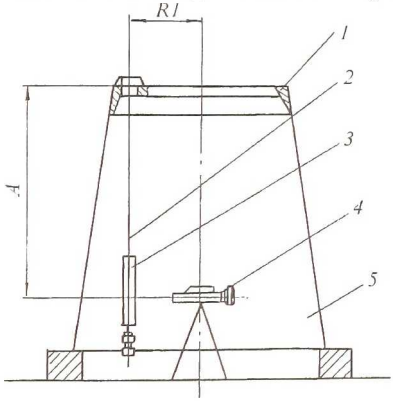


Рис.8.1. Схема замера превышения контролируемых точек с помощью нивелира и отвеса

Замер превышений контролируемых точек изделия *5* с помощью нивелира *4* и отвеса *2* производится следующим образом (рис.8.1). С плоскости верхнего шпангоута *1* опускается отвес со шкалой *3*. Нивелиром, размещенным в середине изделия, установленным на базовой плите, снимается отсчет по шкале отвеса. Затем отвес переставляется по плоскости шпангоута и с помощью нивелира отсчитывается изменение размера ΔA, по которому определяется неплоскостность и непараллельность верхнего и нижнего шпангоутов.

Замер превышений контролируемых точек можно проводить и от материальной базы стенда. Сборочные стенды (рис.8.2) обычно имеют верхнюю жесткую плиту *1*, выставленную в горизонт параллельно нижней базовой плоскости стенда *4*. В этом случае контроль непараллельности и неплоскостности шпангоутов изделия *3* производится замером расстояний от плиты до поверхности верхнего шпангоута *2* в контролируемых точках (h_1, h_2, …, h_n). Разность между

замером первоначальной точки и последующих даст положение всех точек относительно горизонтальной плоскости, проходящей через первую точку.

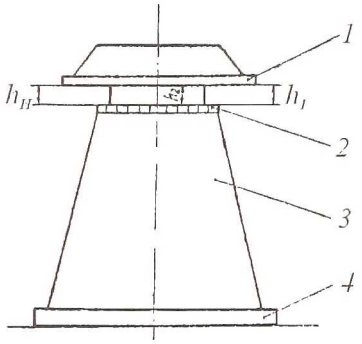


Рис.8.2. Схема замера превышений контролируемых точек от материальной базы стенда

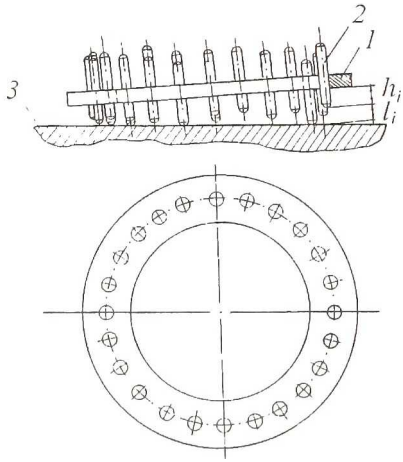


Рис.8.3. Замер непараллельности и неплоскостности с помощью макета

Неплоскостность и непараллельность могут быть определены с помощью макета, представляющего собой плоское кольцо *1* с подвижными штырями *2* одинаковой длины, расположенными по окружности (рис.8.3). Число и положение штырей вдоль окружности должны соответствовать числу проверяемых точек поверхности стыкового шпангоута. Макет размещается над верхним шпангоутом, а штыри выдвигаются и выставляются по поверхности стыкового шпангоута и закрепляются. После этого макет укладывается на плоскую контрольную плиту *3* в перевернутом положении. Макет ляжет на три наиболее выступающих штыря. В таком положении замеряются расстояния от штырей до поверхности контрольной плиты и определяется неплоскостность. Если плоскость кольца при установке штырей установить параллельно базовой плоскости, то уложенный на контрольную плиту макет позволяет определить непараллельность, т.е. угол между плоскостью кольца макета и плоскостью контрольной плиты. Угол определяется либо непосредственным замером, либо путем замера расстояний от поверхности кольца до поверхности плиты с последующим пересчетом на угол. При этом определяется как сама непараллельность, так и её направление.

Точность определения непараллельности и неплоскостности путем замера превышения точек поверхности шпангоута с последующей обработкой результатов замеров составляет ±0,04 мм.

После замера превышения точек любым из методов определяют неплоскостность и непараллельность верхнего шпангоута. *Неплоскостность* максимальное расстояние от прилегающей плоскости до

поверхности шпангоута. Положение прилегающей плоскости задается тремя более выступающими точками поверхности шпангоута, расположенными так, чтобы ось изделия находилась внутри треугольника с вершинами в этих точках. *Непараллельность* угол между прилегающей плоскостью верхнего шпангоута и базовой плоскостью нижнего шпангоута, которая по сути является прилегающей плоскостью нижнего шпангоута.

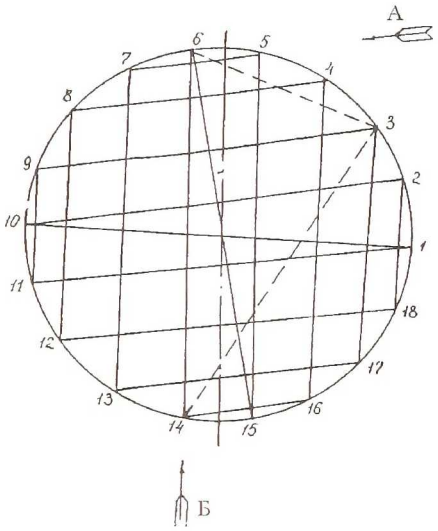


Рис.8.4. Графический метод определения неплоскостности и непараллельности

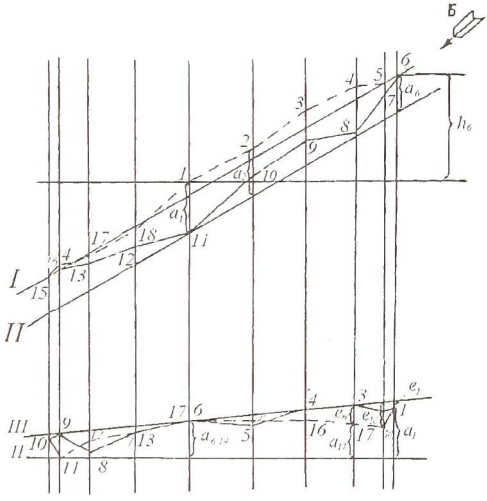


Рис.8.5. Графический метод определения неплоскостности и непараллельности плоскостей разъема

Обработка результатов замеров может производиться графическим или графоаналитическим методами.

При графическом методе выполняются графические построения в указанном ниже порядке (рис.8.4-8.5). Выбирается точка, имеющая наибольшее превышение (рис.8.4, точка *6*), и через нее проводится диаметр окружности, на которой расположены контролируемые точки (*6-15*). От этого диаметра как от нулевой линии откладываются в проекционной связи (рис.8.4, стрелка *А*) в удобном масштабе превышения точек (верхнее изображение на рис.8.5). Полученные на графике точки (верхнее изображение на рис.8.5), расположенные на рис.8.4 по одну сторону диаметра, соединяются сплошной линией, а по другую сторону штриховой линией. Таким образом получаются два ломаных отрезка. Затем проводится прямая линия, прилегающая сверху к одному из этих ломаных отрезков (лучше всего к тому отрезку, точки прилегания к которому расположены на большем расстоянии друг от друга). На рис.8.5 это линия *I* к сплошной ломаной линии. Точки прилегания линии *I* к

ломаной на рис.8.5 соединяются на рис.8.4 отрезком *6-14*. Перпендикулярно этой прямой проводится новый диаметр *1-10* (см. рис.8.4). На рис.8.5 (верхнее изображение) параллельно линии *1* через самую удаленную от нее точку *11* проводится прямая *II*. Расстояния от линии *II* до точек графика, замеряемые в перпендикулярном к нулевой линии направлении, переносятся на новый график (рис.8.5, нижнее изображение). За нулевую линию принимается вновь проведенный на рис.8.4 диаметр. При этом выдерживается новая проекционная связь (рис.8.4, стрелка Б). После построения графика выделенные ранее точки *6* и *14* совпадают. Соединив опять точки ломаными линиями, необходимо провести прилегающую прямую так, чтобы все звенья ломаных линий оказались ниже прилегающей. Если эта прилегающая *III* пройдет через совпавшие точки *6* и *14*, а вторая точка прилегания соответствует на рис.8.4 точке, которая совместно с выделенными ранее точками *6* и *14* образует треугольник, содержащий внутри себя центр окружности, то линия *III* определяет положение прилегающей плоскости. Расстояние от нее до точек графика и есть неплоскостность. Непараллельность определяется путем пересчета с учетом выбранных масштабов.

Если прилегающая линия *III* не пройдет через совпавшие точки *6* и *14*, то следует построить еще один график по типу второго нижнего изображения рис.8.5, заменив соответственно неподошедшие точки *6* и *14* на вновь полученные. К тому же, если полученный треугольник не содержит внутри себя центра окружности, то все построения проделывают вновь, начиная с момента проведения прилегающей линии на верхнем графике рис.8.5, причем прилегающая линия проводится к другому ломаному отрезку.

При графоаналитическом методе первоначально графически определяются три наиболее выступающие точки. С этой целью прочерчивается окружность и на ней размечается положение контролируемых точек (см.рис.8.4). Затем эти точки соединяются с центром окружности радиусами, на которых внутрь окружности в масштабе откладываются превышения точек. Три точки, расположенные наиболее близко к центру окружности, соединяют отрезками прямых. Получаемый треугольник должен содержать внутри себя центр окружности. Если это условие не выполняется, то точка, лежащая на третьем по длине расстоянии от центра, отбрасывается, выбирается следующая и т.д.

8.2. Контроль эксцентриситета, закрутки и искривления оси изделий

Под эксцентриситетом понимается смещение геометрического центра верхнего сечения крупногабаритного изделия относи-

тельно геометрического центра нижнего сечения при неподвижном положении последнего.

Под закруткой по углу верхнего и нижнего сечений крупногабаритных изделий понимается другое отклонение (перемещение) реперных знаков свободного торцевого сечения от базовых продольных плоскостей при несвободном (неподвижном) положении базового сечения.

Контроль этих параметров производится с помощью теодолитов на специальных стендах с неподвижным или подвижным (поворотным) основанием.

Контроль закрутки и эксцентриситета изделия на стенде с неподвижным основанием. На положение реперных точек сечения агрегата влияет как наличие эксцентриситета, так и закрутки данного сечения относительно базового. Поэтому контроль этих параметров ведется совместно по смещению реперных точек верхнего шпангоута относительно нижнего (рис.8.6).

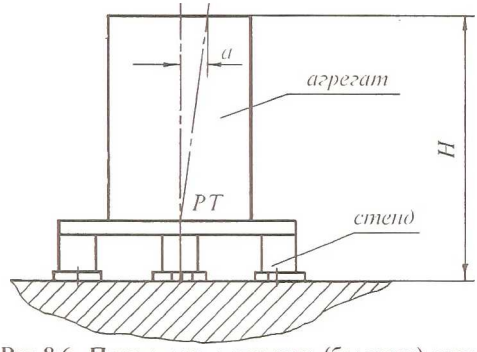


Рис.8.6. Положение реперных (базовых) точек при закрутке агрегата:
РТ - реперная точка; а - смещение РТ

При проведении контроля на неподвижном стенде закрутка и эксцентриситет шпангоутов определяются с помощью трех теодолитов, установленных под углом 90° по базовым плоскостям на одинаковом расстоянии L от центра стенда.

После установки теодолитов по строительным плоскостям нижнего сечения отсека из реперной точки нижнего шпангоута, лежащей в базовой плоскости, визирной трубой теодолита восстанавливается перпендикуляр и измеряется угол α отклонение соответствующей реперной точки верхнего сечения, измеренной в плоскости горизонтального лимба теодолита.

Линейное отклонение a определяется по формуле

$$a = (L\text{-}R_B)\mathrm{tg}\alpha ,$$

где a линейное отклонение реперной точки верхнего шпангоута агрегата; R_B радиус верхнего шпангоута изделия, α угол смещения реперной точки верхнего шпангоута, измеряемый теодолитом.

Измеренное таким образом линейной отклонение реперной точки верхнего шпангоута может быть вызвано двумя факторами: наличием закрутки и эксцентриситета.

Следует определить раздельно значения этих параметров. Так как возможны самые различные сочетания закрутки и эксцент-

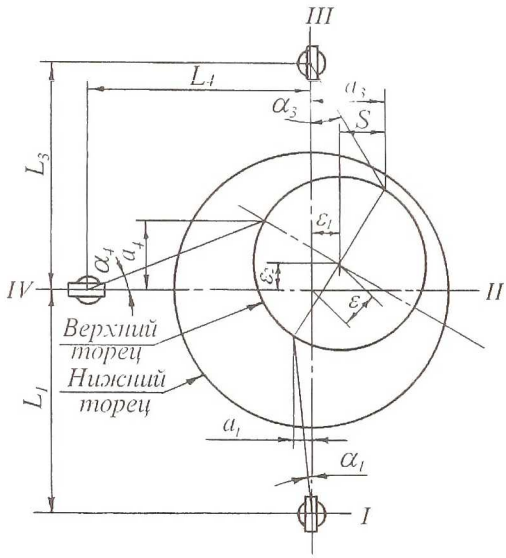


Рис.8.7. Схема измерения закрутки и эксцентриситета агрегата методом трех теодолитов

риситета, то способ их определения рассмотрим на примере (рис.8.7). В расчете необходимо учитывать правило знаков, приведенное ниже.

1. Линейные составляющие эксцентриситета ε_i и отклонений реперных точек a_i вправо от оператора, стоящего лицом к изделию, имеют знак "+", влево "-".
2. Закрутка против часовой стрелки имеет знак "+", а по часовой стрелке - знак "-"

При принятом правиле знаков закрутка и эксцентриситет вычисляется следующим образом. Линейная закрутка в контролируемом сечении определяется как алгебраическая полусумма линейных отклонений реперных точек в одной из базовых плоскостей:

$$S = \frac{a_1 + a_3}{2} .$$

Составляющая эксцентриситета ε_1 определяется как алгебраическая полуразность линейных отклонений реперных точек (в базовой плоскости, перпендикулярной плоскости, в которой определяется составляющая эксцентриситета), причем направление расположения эксцентриситета следует рассматривать со стороны той реперной точки, которая в уравнении стоит на первом месте (является уменьшаемым):

$$\varepsilon_1 = \frac{a_1 - a_3}{2}$$

Составляющая эксцентриситета ε_2 определяется как алгебраическая разность отклонения реперной точки, лежащей на другой базовой плоскости, и закрутки S: $\varepsilon_2 = a_4 - S$

Полное значение эксцентриситета определяется по формуле

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} .$$

Контроль закрутки и эксцентриситета изделий на стенде с вращающимся основанием. При наличии вращающегося основания стенда (рис.8.8) контроль закрутки и эксцентриситета изделий можно

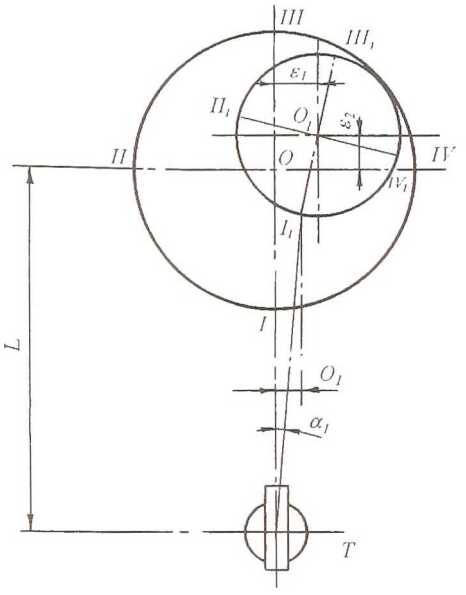


Рис.8.8. Схема контроля закрутки и эксцентриситета изделия на стенде с вращающимся основанием

производить одним теодолитом, установленным по какой-либо базовой плоскости на расстоянии L от центра стенда, причем $L \geq 0{,}6H + R_B$. После установки теодолита в базовой плоскости нижнего сечения изделия из реперной точки нижнего шпангоута, лежащей в базовой плоскости, теодолитом восстанавливается перпендикуляр и измеряется угол α отклонения реперной точки верхнего сечения, измеренной в плоскости горизонтального лимба теодолита. Линейное отклонение $a = (L\text{-}R_B)\mathrm{tg}\alpha$, где L расстояние от центра до теодолита; R_B - радиус верхнего сечения.

Таким же способом измеряются линейные отклонения двух других реперных точек верхнего шпангоута при повороте изделия на 90°, 180°.

Закрутка и эксцентриситет определяются по такой же методике, как при контроле этих параметров на стенде с невращающимся основанием.

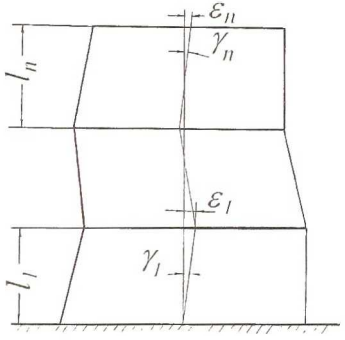


Рис.8.9. Схема контроля искривления продольной оси изделия относительно базовой оси

Контроль искривления оси изделия к базовой оси. Контроль искривления оси изделия на стенде с неподвижным основанием производится с помощью трех теодолитов, установленных под углом 90° по строительным плоскостям. После установки теодолитов из реперной точки нижнего шпангоута, лежащей в базовой плоскости, теодолитом восстанавливается перпендикуляр и измеряются углы α_1, α_2, …, α_n отклонений реперных точек каждой секции, измеренные в плоскости горизонтального лимба теодолита (рис.8.9). Линейное отклонение

$$a = (L\text{-}R_0)\mathrm{tg}\alpha ,$$

где L расстояние от центра стенда до теодолита; R_0 радиус секции соответствующего сечения.

Измеренное таким образом линейное отклонение реперной точки вызывается наличием закрутки и эксцентриситета в данном сечении. Для определения искривления оси необходимо определить эксцентриситет каждого сечения в двух плоскостях.

По составляющим эксцентриситетов в двух плоскостях определяется отклонение осей секций от базовой оси.

Для данного случая имеем:

$$\gamma_1 = \frac{0-\varepsilon_1}{l_1}; \quad \gamma_2 = \frac{\varepsilon_1-(-\varepsilon_2)}{l_2}; \quad \ldots \quad \gamma_n = \frac{\varepsilon_{n-1}-\varepsilon_n}{l_n},$$

где l_i - длина секции.

Таким образом, угол между базовой осью изделия и осью секции в данной плоскости вычисляется как алгебраическая разность составляющих эксцентриситета в нижнем ε_{HC} и верхнем ε_{BC} сечении секции, деленная на длину l_0:

$$tg\gamma \equiv \gamma = \frac{\varepsilon_{HC} \pm \varepsilon_{BC}}{l_0}$$

Определение искривления продольной оси и закрутки при горизонтальном положении изделия. На боковую поверхность изделия (рис.8.10) в контролируемых сечениях наносятся реперные знаки. На каждое сечение наносят по 4 репера *1*, *2*, *3*, *4* (по два на каждую плоскость стабилизации, рис.8.10,а).

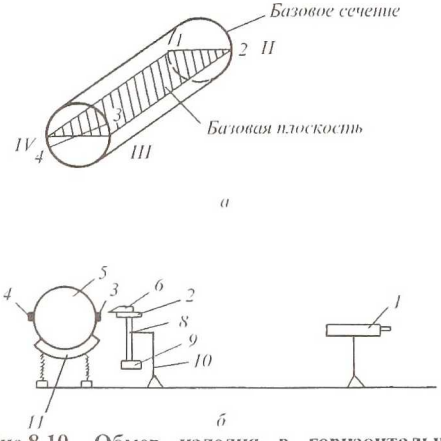


Рис.8.10. Обмер изделия в горизонтальном положении:
а базовые сечения и точки отсчета; б схема установки изделия и обмера

Изделие располагается на регулируемых по высоте опорах *11*. Обмер производится последовательно сначала на одной плоскости стабилизации, а затем на другой.

За базовую плоскость при обмере принимается плоскость, задаваемая двумя реперами на базовом сечении и центром другого сечения, определяемым как середина отрезка, соединяющего расположенные на этом сечении реперы *3* и *4*.

Базовая плоскость устанавливается в горизонтальное положение с помощью нивелира *1* и специальных линеек *2* на стойках *10* (рис.8.10, б). Линейка имеет груз *9* на нижнем своем конце, чтобы обеспечить

вертикальность её положения, а также узел подвески *8* по типу подвески коромысла аналитических весов, т.е. на призме. На верху линейки расположена площадка, которая при вертикальном положении линейки имеет строго горизонтальное положение. На верхней площадке укладывается планка с острым концом *6*, которая имеет возможность поворачиваться и передвигаться, но всегда её нижняя плоскость лежит на площадке. При этом острый конец планки постоянно находится на одном уровне с поверхностью площадки и может с высокой точностью устанавливаться по реперу, для чего стойка, на которой подвешивается линейка, может плавно регулироваться по высоте. Для снятия отсчетов на линейке имеются деления. Установка базовой плоскости производится в следующем порядке: репера базового сечения выставляются на одной высоте, репера второго сечения устанавливаются так, чтобы полусумма отсчетов по соответствующим линейкам была равна высоте реперов базового сечения. После установки изделия 5 осуществляется его обмер. Определяются положения всех реперов относительно горизонтальной плоскости, для чего устанавливаются линейки и наводятся на репера, снимаются отсчеты и вычитается базовая высота.

Закрутка сечения определяется разностью превышения реперов, расположенных в этом сечении. Угол закрутки определяется по формуле

$$\varphi = \Delta z_{3\text{-}4} / d_{отсека},$$

где $\Delta z_{3\text{-}4}$ - разность превышений реперов; $d_{отсека}$ диаметр отсека.

Положение центров сечений, а следовательно, и излом оси изделия определяется полусуммой превышений, взятых с соответствующим знаком. Истинное положение оси определяется путем сложения отсчетов, полученных для каждого обмера с учетом поворота изделия на 180°

8.3. Оптико-аналитический метод обмера геометрических параметров изделий

Суть метода: используя оптические средства, определить координаты характерных точек изделия, а затем, используя формулы аналитической геометрии, рассчитать на ЭВМ все необходимые геометрические параметры. Метод позволяет определить любые параметры, которые могут быть вычислены по координатам характерных точек (закрутка торцевых шпангоутов отсека, неплоскостность стыковых шпангоутов отсека, углы и направление наклона плоскостей стыковых шпангоутов отсека, координаты некоторых точек в системе координат, связанной с изделием, изгиб оси изделия и другие).

Точность определения геометрических параметров изделия характеризуется точностью определения координат характерных то-

чек. При этом характерными точками могут быть как реперные знаки на поверхности самого изделия, так и реперные знаки, расположенные на различных переходниках, устанавливаемых на изделии. Число реперных знаков и их расположение зависят от определяемых геометрических параметров и для каждого конкретного случая устанавливаются отдельно. Методики расчета геометрических параметров различны для различных параметров, но в любом случае для расчетов необходимо знать координаты характерных точек.

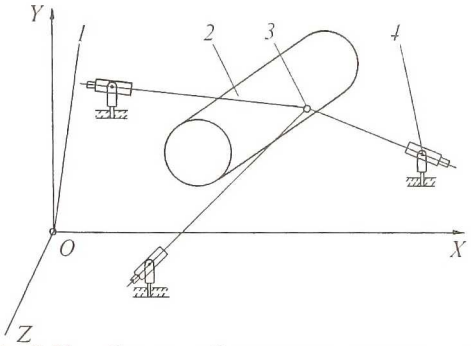


Рис.8.11. Схема обмерочного стенда типа теодолитовая площадка

Обмерочный стенд представляет собой обычную бетонированную площадку со специальными опорами для установки теодолитов и с нулевым знаком *1*, задающим начало системы координат, связанной с теодолитовой площадкой (рис.8.11). Система координат выбрана таким образом, что одна из её осей (ось *OY*) вертикальна, а координаты всех характерных точек изделия *2*, устанавливаемого на теодолитовой площадке, удовлетворяют условию ($x_j>0$; $y_j>0$; $z_j>0$). В этой системе координат заранее определены координаты точек пересечения осей вращения теодолитов $\{x_i, y_i, z_i\}$, где i=1, 2, 3, …, n - номер теодолита.

Таблица 8.1.

Результаты обмера изделия

№ теодолита	Направление на реперный знак											
	0			1			…			*m*		
	o	'	"	o	'	"	o	'	"	o	'	"
1.Отсчет по горизонтальному лимбу	ψ_{10}			ψ_{11}			…			ψ_{1m}		
Отсчет по вертикальному лимбу	α_{10}			α_{11}			…			α_{1m}		
2. Отсчет по горизонтальному лимбу	ψ_{20}			ψ_{21}			…			ψ_{2m}		
Отсчет по вертикальному лимбу	α_{20}			α_{21}			…			α_{2m}		
…	…			…			…			…		
n. Отсчет по горизонтальному лимбу	ψ_{n0}			ψ_{n1}			…			ψ_{nm}		
Отсчет по вертикальному лимбу	α_{n0}			α_{n1}			…			α_{nm}		

Число теодолитов *4* и их расположение должны быть такими, чтобы каждый реперный знак был виден как минимум с двух теодолитов. Помимо этого необходимо учесть, что точность определения координат реперных знаков зависит от расстояния между теодолитом и реперным знаком (для реперного знака, находящегося на расстоянии 25 метров от теодолита, точность определения координат должна составить примерно 0,25 мм, а для знака на расстоянии 50 метров - примерно 0,6 мм).

Изделие неподвижно установлено на теодолитовой площадке. При этом положение изделия относительно осей координат безразлично. Процесс обмера весьма прост: последовательно наводя все теодолиты на каждый реперный знак *3*, начиная с нулевого, снимать отсчеты с лимбов теодолита и заносить их в таблицу (табл.8.1). В случае, если с теодолита *i* не виден реперный знак *j*, в таблицу заносятся значения $\psi_{ij} = 444°44'44''$ и $\alpha_{ij} = 444°44'44''$, что условно означает отсутствие видимости. Отсчет по вертикальному лимбу α_{ij} имеет положительное значение, если реперный знак *j* лежит выше точки пересечения осей вращения теодолита *i*.

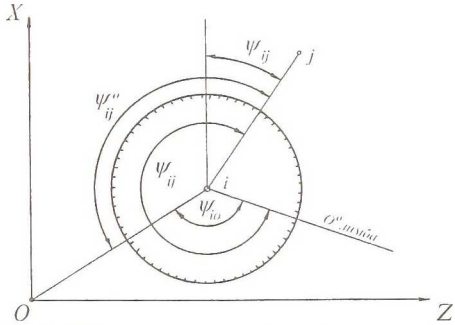


Рис.8.12. Горизонтальный лимб теодолита: *j* **реперный знак номер** *j*; *0* **нулевой реперный знак;** *i* **- точка пересечения осей вращения теодолита номер** *i*; ψ_{i0} **- отсчет по лимбу теодолита номер** *i*, **направленного на нулевой реперный знак;** ψ_{ij} **- отсчет по лимбу теодолита номер** *i*, **направленного на реперный знак номер** *j*; ψ''_{ij} **угол между направляющими с теодолита номер** *i* **на нулевой знак и на реперный знак номер** *j*; Ψ_{ij} **угол между положительным направлением оси** *X* **и направлением с теодолита номер** *i* **на реперный знак номер** *j*

Обработка результатов на ЭВМ ведется в следующем порядке.

1. Переход к измерению углов в радианах.
2. Расчет углов между положительными направлениями оси *X* и направлением с *i*-го теодолита на *j*-й реперный знак (рис.8.12):
3. Расчет координат реперных знаков в системе координат, связанной с теодолитовой площадкой.
4. Переход к системе координат, связанной с изделием.
5. Расчет необходимых геометрических параметров.

8.4. Пример контроля точности секции фюзеляжа с помощью контрольного стенда

Параметры контроля: длина секции *L*, точность контура (обвода), Δ_{jk}, закрутка плоскостей разъемов, положение привалочных

плоскостей узлов разъема секции. Измерения производятся на специальном контрольном стапеле (стенде), устройство которого показано на рис.8.13.

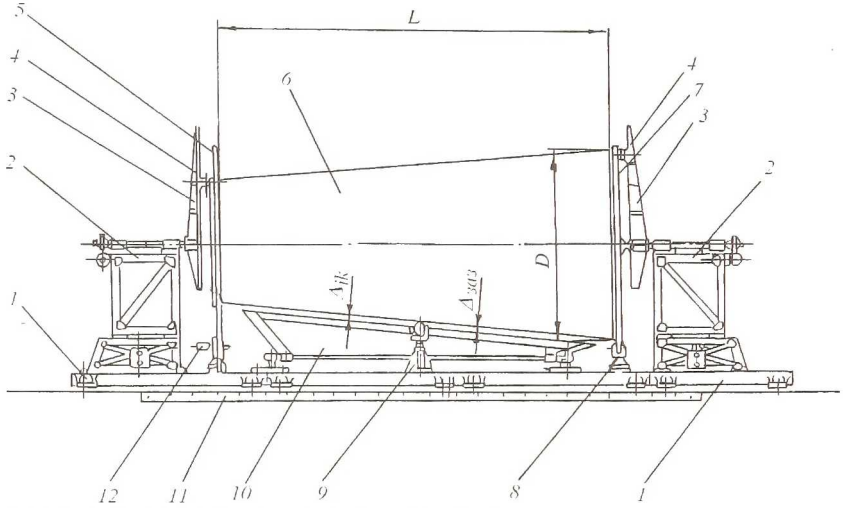


Рис.8.13. Конструктивная схема контрольного стенда:
1 основание (стол) стенда; 2 подвижные бабки; 3 вращающаяся штанга; 4 индикатор часового типа; 5 - обмерочное кольцо (ОК-1); 6 - контролируемое изделие; 7 - обмерочное кольцо (ОК-2); 8,9 - катки (подвижные опоры); 10 - шаблон; 11 - линейка; 12 - штыревой фиксатор

Процесс измерения точности секции фюзеляжа производится в следующем порядке.

1. Подготовка контрольного стапеля (стенда) к работе:
   а) проверить работу всех узлов;
   б) установить индикаторы часового типа;
   в) установить подвижные бабки на расстояние, соответствующее длине секции фюзеляжа;
   г) установить шаблоны.
2. Установка и крепление контрольных колец по узлам разъема агрегата и транспортировка к стенду.
3. Установка агрегата в контрольный стапель на катки под кольца и фиксация штырем по строительной оси.
4. Замер длины секции *L*. Осуществляется с помощью линейки, закрепленной на столе стенда, а также специальных переходных мерительных приспособлений, которые дают возможность снять показания с линейки. Эти приспособления нужны потому, что плоскости разъемов не совпадают с нулевым делением линейки. Данные измерений заносятся в паспорт изделия.

   Замер точности контура (обвода). Производится с помощью шаблонов, устанавливаемых в теоретическое положение контура в продольной плоскости. Шаблоны устанавливаются по базовым

пластинам с помощью штанген-рейсмуса. Перемещение шаблонов осуществляется регулируемыми опорами. Шаблоны устанавливаются относительно теоретического контура с эквидистантным зазором ($\Delta_{заз\ ном}$) (5...15 мм). С помощью специального клиновидного щупа замеряют действительный зазор $\Delta_{i\ заз\ факт}$ между рядом отдельных указанных точек обвода фюзеляжа и шаблонами и таким образом определяют отклонение действительного контура от теоретического. Эти измерения производятся в четырех положениях изделия по строительным осям (*I-II-III-IV*): $\Delta_{ik} = \Delta_{i\ заз\ ном} - \Delta_{i\ заз\ факт}$.

6. Замер закрутки плоскостей разъемов секции (рис.8.14). Производится с помощью контрольных обмерочных колец и специального нониусного приспособления с указателем. Базовое кольцо, расположенное на стыковочном шпангоуте, устанавливается в номинальное положение и фиксируется штырем. Поворот контрольного кольца, расположенного на концевом шпангоуте относительно горизонтальной оси $\alpha_{закр}$, измеряется с помощью специального приспособления по угловой шкале, нанесенной на контрольном кольце.

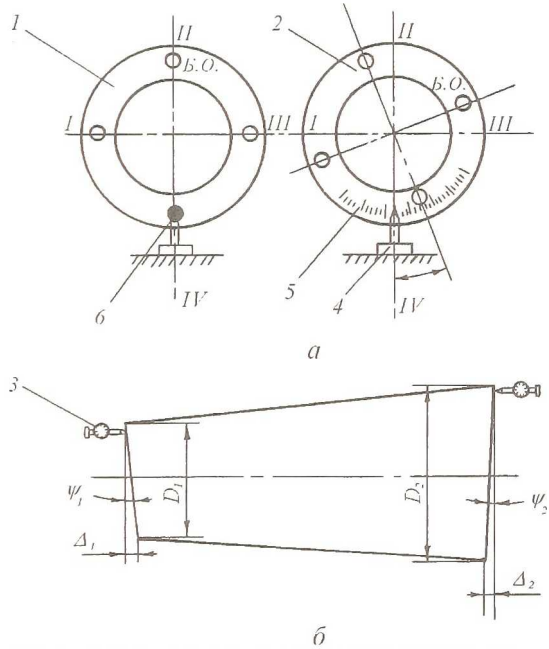


Рис.8.14. Схема измерения геометрических параметров агрегатов:
а - замер угла закрутки, б - замер угла отклонения плоскости стыковых шпангоутов; 1 - обмерочное кольцо (ОК-1), 2 - обмерочное кольцо (ОК-2), 3 - индикатор часового типа, 4 - указатель угла закрутки, 5 - шкала угловая с нониусом, 6 - штыревой фиксатор

Измерение отклонения привалочных плоскостей от вертикальной плоскости, производится с помощью индикаторного устройства поворотом его относительно четырех точек плоскости разъема, расположенных на строительных осях *I*, *II*, *III*, *IV*. За нулевую базу отсчета берется точка *I* (Δ_I).

Порядок замера следующий: фиксируется положение (смещение) точки Δ_I и устанавливается на ноль индикатор; измеряется смещение остальных точек индикатора Δ_{II}, Δ_{III} и Δ_{IV}.

Наибольшее смещение определяется по направлениям строительных осей: $\Delta_{I-III} = \Delta_I - \Delta_{III}$; $\Delta_{II-IV} = \Delta_{II} - \Delta_{IV}$.

Допустимое отклонение определяется по наибольшему смещению относительно нулевой точки. Результаты измерений заносятся в паспорт.

Угловое смещение определяется как

$$tg\Psi_1' = \Delta_{I-III} / D_1; \quad tg\Psi_1'' = \Delta_{II-IV} / D_1$$

где Δ_{I-III} и Δ_{II-IV} - наибольшее смещение точек привалочной плоскости агрегата по направлению строительных осей *I-III* и *II-IV*; D_1- диаметр стыкового шпангоута изделия; Ψ_1' и Ψ_1'' углы отклонения 1-го стыкового шпангоута от вертикали, замеренные по двум направлениям базовых осей изделия *I-III* и *II-IV*.

8.5. Примеры обмера некоторых блоков ракеты-носителя "Молния"

На рис.8.15 представлена схема обмера блока И ракеты-носителя "Молния", а на рис.8.16 приведена схема измерения искривления этого блока.

Обмер блока производится следующим образом.

1. Выставить теодолиты по нулевым рискам на марках и неподвижным нониусам на опорах стенда.
2. Визировать теодолит на реперную точку в базовом сечении К-К. Сделать отсчеты отклонений реперных точек сечения К-К в направлениях А, Б, В, Г. Сместить зрительную трубу теодолита до совмещения в сечении К-К, для чего сдвинуть теодолит в направлении У-У (рис.8.15).
3. Выдвинуть подвижный нониус на марках на полу. Совместить О подвижных нониусов с линией визирования на точку в базовом сечении К-К.
4. Выставить блок И в вертикальное положение с учетом закрутки сечения Л-Л относительно базового сечения К-К. Закрутка определяется по формулам

$$\Delta S_{Л-Л}^{I-III} = \frac{l_A \pm l_B}{2}, \quad \Delta S_{Л-Л}^{II-IV} = \frac{l_Б \pm l_Г}{2},$$

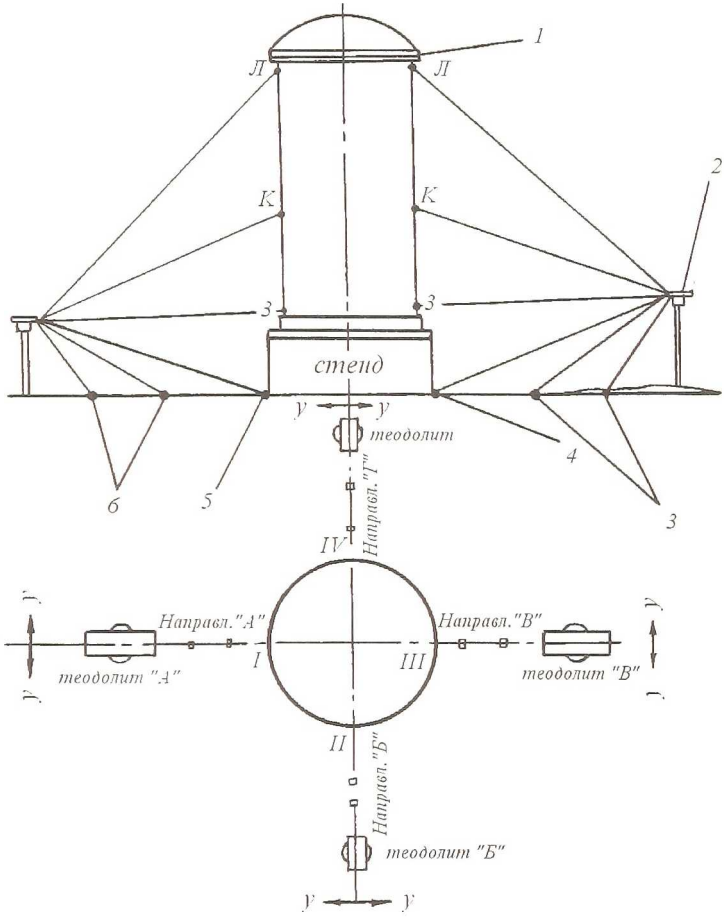


Рис.8.15. Схема обмера блока И ракеты-носителя "Молния":
1 кольцо; 2 - теодолит; 3,6 марки на полу цеха; 4,5 марки на стенде

где l_A, $l_Б$, l_B, $l_Г$ отклонения реперных точек сечения Л-Л относительно базовой продольной оси в направлениях А, Б, В, Г; ΔS - не должна превышать значений, указанных в КД.

5. Сборка считается установленной вертикально, если реперные точки сечения Л-Л (с учетом закрутки) лежат в одной плоскости. Если это условие не достигнуто, то с помощью домкратов стенда добиться, чтобы данное условие было выполнено (наклоном блока).
6. Произвести замер отклонения реперной точки сечения 3-3 в направлениях А, Б, В, Г

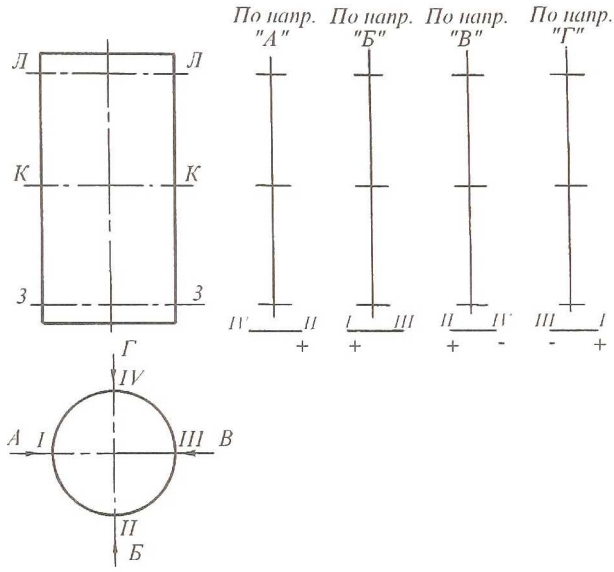


Рис.8.16. Схема измерения искривления блока И ракеты-носителя "Молния"

7. Определить фактическое искривление оси в направлениях А и В и в направлениях Б и Г по формулам ($l_3^А$, $l_3^Б$, $l_3^В$, $l_3^Г$ брать со своими знаками).

$$Y^{II-IV} = \frac{l_3^A + l_3^B}{2}, \quad Y^{I-III} = \frac{l_3^Б + l_3^Г}{2},$$

8. Определить закрутку сечения З-З относительно базовой оси К-К по результатам обмера блока И в направлениях *I-III*, *II-IV*. Значение ΔS брать со знаком "+", если сечение закручено против часовой стрелки (вид на сечение по полету), и со знаком "-", если сечение закручено по часовой стрелке (рис.8.17).

Определить среднее значение закрутки

$$\Delta S_3 = \frac{\Delta S_3^{I-III} + \Delta S_3^{II-IV}}{2},$$

где для варианта I: $\Delta S_3^{I-III} = \frac{l_3^A + l_3^B}{2}$ и $\Delta S_3^{II-IV} = \frac{l_3^Б + l_3^Г}{2}$,

а для варианта II: $\Delta S_3^{I-III} = \frac{l_3^A - l_3^B}{2}$ и $\Delta S_3^{II-IV} = \frac{l_3^Б - l_3^Г}{2}$

9. Замерить квадрантом угол α между передним торцом шпангоута блока И и продольной осью по направлениям *I-II*; *II-IV* (неперпендикулярность шпангоута к продольной оси сборки).
10. Замерить квадрантом угол между задним торцом шпангоута блока И (шпангоут хвостового отсека) и продольной осью по на-

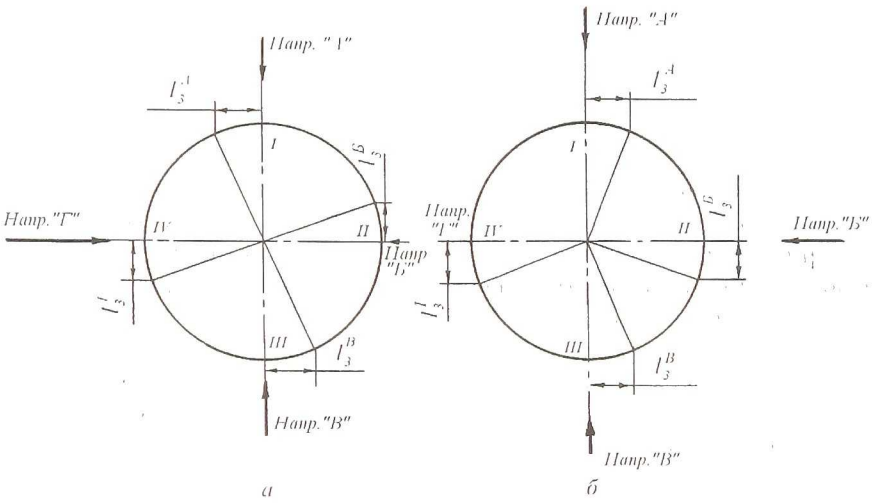


Рис.8.17. Схема измерения закрутки:
а - вариант I; б - вариант II

правлениям *I-III*, *II-IV* (неперпендикулярность шпангоута к продольной оси сборки).

На рис.8.18 представлена схема установки центрального блока РН "Молния" в горизонтальном положении, а на рис.8.19 приведена схема определения искривления оси этого блока.

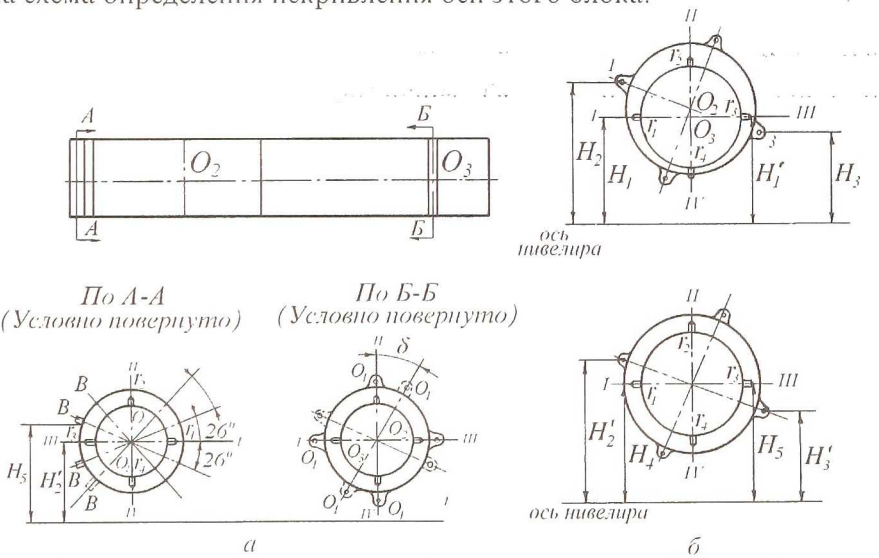


Рис.8.18. Схема установки центрального блока ракеты-носителя "Молния" в горизонтальное положение:
а - схема установки; б - схема обмера блоков РН

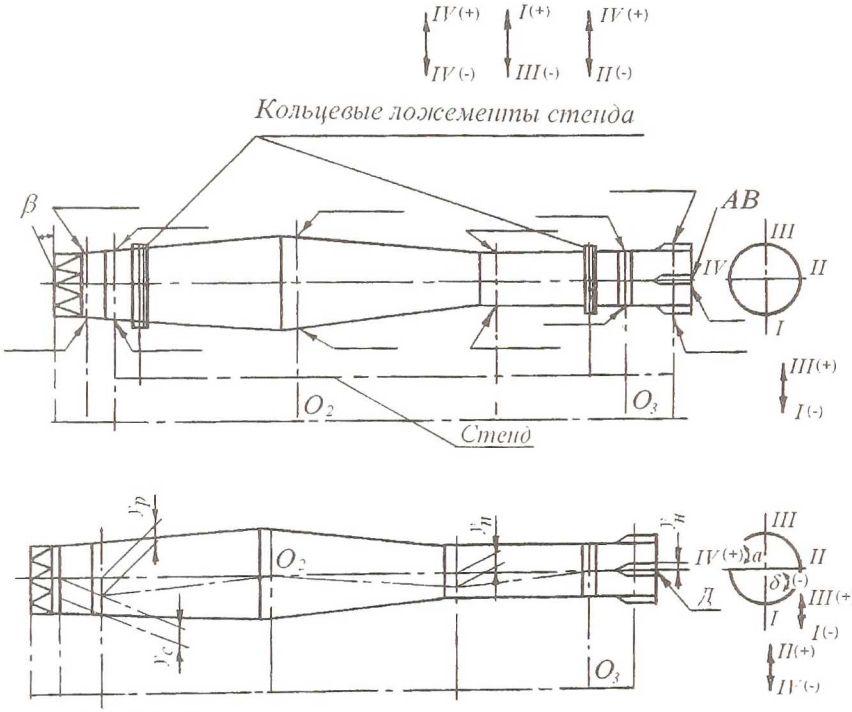


Рис.8.19. Схема определения искривления оси центрального блока ракеты-носителя "Молния"

Для проведения данных работ необходимо следующее.

1. Установить блок в горизонтальное положение.
2. Установить нивелир L=1600 мм с точностью 8″.
3. Установить блок в горизонтальное положение по нивелиру и нивелировочным линейкам. Установку блока производят по базовым точкам O_2 и O_3, а искривление оси блока контролируют по промежуточным точкам Y_p, Y_c, $Y_п$, $Y_к$.
4. Определить размеры:

$$H_2' = H_1 + \frac{H_2 - H_3}{2}\text{, при } H_2 > H_3;$$

$$H_2' = H_1 + \frac{H_3 - H_2}{2}\text{, при } H_3 > H_2;$$

$$H_4 = H_5 = \frac{H_2' + H_3'}{2},\quad .$$

5. Замерить углы β (угол между плоскостью фермы и перпендикуляром к продольной оси блока) при различных положениях сборки: β_I - плоскость I блока вниз; β_{IV} - плоскость IV блока - вниз; β_{III} плоскость III блока - вниз; β_{II} - плоскость II блока - вниз:

$$\beta_{I-III} = \frac{\beta_I - \beta_{III}}{2}, \quad \beta_{II-IV} = \frac{\beta_{II} - \beta_{IV}}{2}.$$

При установленном в горизонтальное положение блоке проверить нивелиром отклонение точки O_1 (центра сферической опоры верхнего узла связи) от технических базовых плоскостей. Технологическими базовыми плоскостями являются в одном случае плоскость, проходящая через реперные точки r_2 и r_4 и центр O_2, в другом плоскость, проходящая через реперные точки r_1 и r_3 и центр O_2. Допустимое значение $\delta=\pm22'$, что соответствует разнице между размерами H_3' и H_5 или H_2' и H_4, но не более ±8,5 мм.

Результаты измерений занести в табл.8.2.

Таблица 8.2.

Результаты измерения искривления оси центрального блока ракеты-носителя "Молния"

Плоскость измерения	Результат измерения мм	Обозначение					Превышение знаков друг над другом	Среднее значение угла	
		Y_c	Y_p	Y	Y_n	D	Y_c-Y_p	β_{I-III}	β_{II-IV}
I-III	Фактический								
	Допустимый								
II-IV	Фактический								
	Допустимый								

8.6. Нивелировочные работы

Нивелировка является заключительным этапом сборки ЛА. Цель нивелировки контроль геометрических параметров планера и регулировка органов управления полетом. Рассмотрим пример нивелировки самолета [26].

Основные размеры агрегатов и размеры, определяющие их положение, приводятся обычно на общем виде самолета. Допуски на размеры зависят от класса самолета, его агрегатов и скорости полета. По статистическим данным для самолетов со скоростью полета 600...1000 км/ч устанавливаются следующие допуски на угловые размеры: $\Delta V=\pm5'$, $\Delta\alpha=\pm10'$, $\Delta\psi=\pm2'$, $\Delta\gamma=\pm30'$, где ΔV допуск поперечного угла крыла; $\Delta\alpha$ - допуск установочного угла крыла; $\Delta\psi$ допуск положения плоскости стыка фюзеляжа; $\Delta\gamma$ допуск угла стреловидности крыла.

На основании чертежа общего вида самолета разрабатывается его нивелировочная схема, в которой взаимное положение агрегатов определяется линейными или угловыми размерами по нивелировочным точкам. Положение этих точек выбирают с таким расчетом, чтобы можно было наиболее точно задавать положение агрегата относительно базовых осей самолета иметь возможность определять вертикальные и горизонтальные линейные размеры с помощью оптических приборов и универсальных мерительных средств. В нивелировочной схеме размеры даются с учетом деформаций конструкций под действием собственной массы. Для каждого самолета составляется таблица замеров, которая заносится в нивелировочный паспорт.

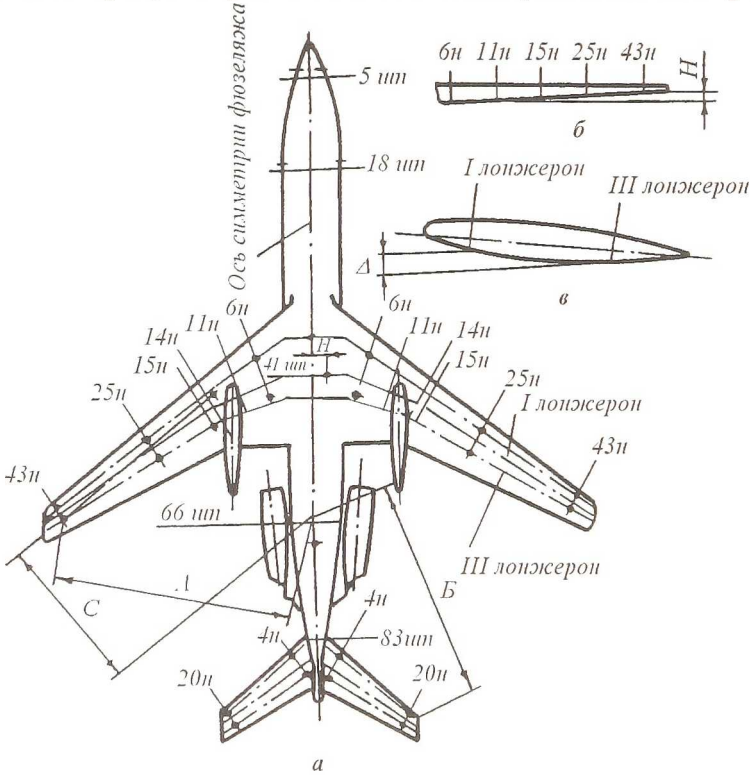


Рис.8.20. Схема расположения реперных точек на самолете Ту-154: а - вид на самолет снизу; б, в - вид на крыло

На рис.8.20, 8.21 показаны схемы расположения реперных точек планера самолета Ту-154. Нивелировка производится на пустом самолете (с оборудованием и без горючего) после окончательной сборки. За нивелировочную плоскость принимается плоскость, проведенная через точки на строительной горизонтали у шпангоутов №18 и 66. Эти же точки служат для установки фюзеляжа в горизон-

тальное положение. Реперные точки даны в виде кернов на обшивке или заклепках. Поперечная установка самолета производится по реперным точкам 1-го лонжерона крыла на нервюрах №6. За ось симметрии самолета принимается прямая, проведенная через проекции осевых реперных точек на шпангоутах №5 и №66 на горизонтальную плоскость. Реперные точки по оси симметрии фюзеляжа на шпангоутах №5, 41, 66 и 83 даны в виде отверстий с резьбовым стаканчиком для сережки под нить отвеса. Реперные точки на крыльях и оперении закернены. Все реперные точки обведены красным кругом диаметром 30 мм с толщиной линии 5 мм.

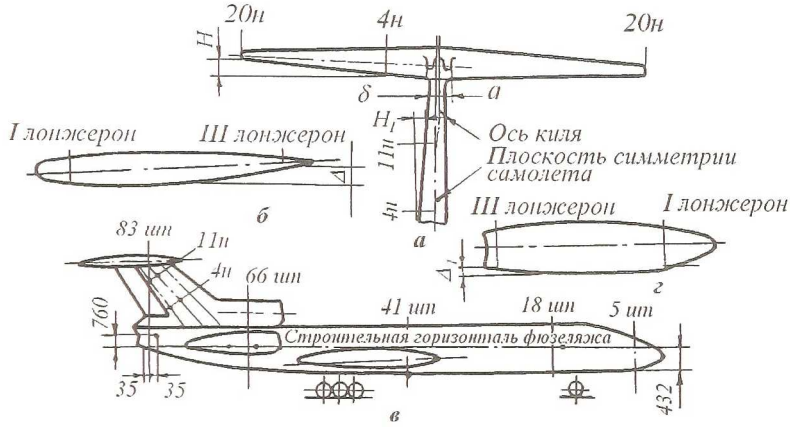


Рис.8.21. Схема расположения реперных точек на самолете Ту-154:
а - вид на оперение спереди; б - вид на стабилизатор сбоку; в - вид сбоку на самолет; г - вид на поперечное сечение киля

Нивелировочные размеры самолета Ту-154 и отдельных его агрегатов приведены в табл.8.3-8.7.

Таблица 8.3.

Проверка симметрии самолета (рис.8.20, а)

Проверяемый параметр	Допустимое значение, мм
Разность размера "А" по левому и правому крылу	30
Разность размера "Б" по левой и правой консоли стабилизатора	20
Разность размера "С" по левому и правому крылу	10

Разница в закрутке одного крыла относительно другого по нервюре №43 не более 0°20′, т.е. 6 мм.

Таблица 8.4.

Нивелировка фюзеляжа (рис.8.20, а и 8.21, в)

Наименование замера	№ шпангоутов				
	5	18	41	66	83
Смещение реперных точек от строительной горизонтали (теоретическое), мм	-432	0	---	0	760
Смещение реперных точек от строительной горизонтали с учетом прогиба от массы конструкции, мм	-448	0	---	0	738
Допуск, мм	±3	---	---	---	±6
Смещение реперных точек от оси симметрии фюзеляжа, мм	0	---	11	0	0
Допуск, мм	---	---	±6	---	±6
Допустимая разница замеров по реперным точкам на правом и левом бортах (проверка на закрутку), мм	---	±3	---	±3	---

Таблица 8.5.

Нивелировка крыла по поперечному углу V и установочному углу α (рис.8.20, в)

Наименование замер	№ нервюры				
	6	11	15	25	43
Теоретическое превышение реперных точек третьего лонжерона над точкой нервюры №6 H, мм	0	145	213	205	195
То же превышение с учетом прогиба от массы конструкции H, мм	0	147	216	189	117
Допуск, мм	---	±3	±3	±8	±15
Превышение реперных точек 1-го лонжерона над реперными точками III-го лонжерона по осям нервюр, теоретическое Δ, мм	64	78	11	-2	-17
То же превышение с учетом деформации Δ, мм	69	89	23	10	-10
Допуск, мм	±5	±4	±6	±8	±9

Завал определяется как полуразность замеров внешней боковой поверхности узла подвески стабилизатора относительно оси самолета справа и слева $\Delta l=(a-б)/2$ (рис.8.21,а).

В настоящее время разработан ряд систем и, в частности, лазерно-центрирующая измерительная система, позволяющая производить нивелировку самолета по опорным лазерным лучам.

Таблица 8.6.

Нивелировка вертикального оперения - киля (рис.8.21, а, в, г)

Наименование замера	Теоретическое смещение	Допуск, мм
Превышение реперной точки нервюры 4 над реперной точкой нервюры 11 по оси III-го лонжерона киля H_1, мм	48	±10
Превышение реперной точки I-го лонжерона над реперной точкой III-го лонжерона по оси нервюры 4 Δ_1, мм	78	±4,5
Превышение реперной точки I-го лонжерона над реперной точкой III-го лонжерона по оси нервюры 11 Δ_1, мм	62	±3,5
Отклонение киля от вертикальной прямой Δl, мм (завал киля)	±3	±5

Таблица 8.7.

Нивелировка горизонтального оперения-стабилизатора (рис.8.21, а, б)

Наименование замера	Установочный угол	Смещение, мм		Допуск, мм
		теоретическое	с учетом деформации	
Превышение реперной точки нервюры 20 над точкой нервюры 4 по оси III-го лонжерона H, мм	0° -1°30' -7°	55 151 509	36 131 491	±5
Превышение реперной точки III-го лонжерона над точкой 1 лонжерона по оси нервюры 20 Δ, мм	0° -1°30' -7°	48 69 145	46 67 143	±5
Превышение реперной точки III-го лонжерона над точкой 1 лонжерона по оси нервюры 4 Δ, мм	0° -1°30' -7°	76 111 230	72 106 225	±5

После определения координат всех нивелировочных точек самолета рассчитывают их превышение и сравнивают с допустимыми значениями, приведенными в таблицах нивелировочного чертежа.

9. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ БАКОВ-ЕМКОСТЕЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

9.1. Система испытаний баков-емкостей летательных аппаратов

С целью обеспечения соответствия баков-емкостей ЛА высоким требованиям, предъявляемым к ним, в технологическом процессе их изготовления большое место занимают контрольно-испытательные работы. Определение объема, программы и технологии испытаний баков и емкостей является чрезвычайно сложной задачей, решаемой конкретно для данной емкости в соответствии с требованиями, назначением и условиями эксплуатации [42].

Несмотря на значительное отличие испытаний различных емкостей и баков, они составляют определенную систему, состоящую из следующих отдельных этапов, которые выполняются по специальным программам.

Конструктивно-доводочные испытания (КДИ), целью которых является отработка конструкции бака или емкости, уточнение отдельных конструктивных решений, проверка функционирования отдельных элементов и соответствия конструкции основным предъявляемым требованиям. КДИ проводятся для небольшой партии (3...6) емкостей. Программа КДИ включает в себя испытания на прочность емкости и отдельных элементов (перегородок, сильфонов, диафрагм и т.д.), на герметичность, циклические испытания на повторные нагрузки, вибро- и ударные испытания, испытания на функционирование отдельных элементов, определение фактического давления разрушения и т.д.

Чистовые доводочные испытания (ЧДИ), целью которых является окончательное уточнение всех конструктивных особенностей емкостей, проверка их технологичности и возможности экономичного изготовления, соответствия конструкции всем требованиям, определение ресурсов работы. ЧДИ обычно проводятся для небольшой партии емкостей, но большей, чем КДИ (6...9). Программа ЧДИ несколько шире КДИ и включает в себя определение массы и вместимости бака, прочностные испытания бака и отдельных элементов, испытания на герметичность, циклические испытания повторным нагружением, вибро- и ударные испытания, испытания на функционирование (срабатывание) отдельных элементов, определение объема невырабатываемого остатка компонента, определение фактического давления разрушения емкости (на части емкостей из партии) и т.д. Часть емкостей подвергается коррозионным испытаниям в среде

компонентов по специальным программам для определения возможного срока хранения заправленной емкости.

Испытания установочной партии (ИУП), целью которых является проверка отработанности и стабильности технологического процесса изготовления и сборки. ИУП проводятся для небольшой партии (3...5) емкостей. Программа ИУП включает в себя испытания на прочность и герметичность емкостей и отдельных элементов, вибро- и ударные испытания, испытания на функционирование и т.д.

Приемо-сдаточные (приемные) испытания (ПСИ) проводятся для всех изготовленных емкостей и баков с целью проверки соответствия каждого бака требованиям ТУ. Особенностью их является обеспечение минимального ущерба качеству и надежности емкостей от проводимых испытаний, например, вместо обычной воды при испытаниях применяют дистиллированную воду с антикоррозионными добавками, тщательно проводится контроль чистоты и целостности емкостей после испытаний, не допускается наличие паров спирта (после промывки) или газов, используемых при отдельных испытаниях и т.д. Программа ПСИ в наибольшей степени зависит от конструкции и требований к конкретным емкостям и бакам и включает в себя в общем случае следующие виды контроля и испытаний: контроль геометрических параметров, определение массы и вместимости емкости (тарировка), испытания на прочность и герметичность баков, отдельных элементов, определение объема невыработанного остатка компонента, проверка функционирования отдельных элементов бака, контроль чистоты внутренних полостей, контроль на отсутствие паров спирта и газов, контроль внешним осмотром целостности элементов, поверхностей и теплозащитных покрытий и т.д. После ПСИ производится консервация емкостей.

Контрольно-выборочные (типовые) испытания (КВИ) проводятся с целью периодического контроля стабильности технологического процесса и качества баков и емкостей. Обычно КВИ проводятся выборочно для небольшого числа баков и емкостей от партии. Повторные КВИ (в случае неудовлетворительных результатов и после устранения их причин) проводятся на удвоенном числе баков. На КВИ поступают емкости, успешно прошедшие ПСИ. Программа КВИ включает в себя следующие виды испытаний: проверку функционирования отдельных элементов, испытания герметичности емкости и отдельных её элементов, циклические испытания, виброиспытания на прочность и определение разрушающих нагрузок. Таким образом, главное отличие КВИ от ПСИ заключается в испытании выбранных емкостей до разрушения.

Приведенные этапы испытаний составляют единую систему испытаний при постановке в производство новых изделий. Иногда некоторые этапы испытаний могут совмещаться (например, КДИ и ЧДИ) или вообще отсутствовать, могут отличаться от приведенных программ. Готовые

баки и емкости, идущие на общую сборку изделия, подвергаются только приемным испытаниям [42].

9.2. Методы испытания емкостей на прочность

Как показано выше, в программы отдельных этапов системы испытаний входят различные виды испытаний баков и емкостей, основными из которых являются испытания на прочность и герметичность.

Испытания на прочность являются одним из основных видов испытаний емкостей. Им подвергаются все емкости, и они входят во всех случаях в программу ПСИ. Испытания на прочность, как правило, предшествуют испытаниям на герметичность и динамическим испытаниям, проводятся при давлениях $P_{исп}$= (1,15...1,25)$P_{раб}$, где $P_{раб}$ максимальное рабочее давление в емкости. Иногда испытательное давление назначают на (30...40)% выше рабочего (для изделий, работающих в спецусловиях) [9, 51, 74, 80].

Испытания на прочность производятся жидкостью, представляющей собой раствор ингибитора ($K_2Cr_2O_7$ или Na_2HPO_4) в дистиллированной воде. Этот раствор обладает повышенными коррозионно-стойкими свойствами и, имея желтоватую окраску, заметен в случае утечки в местах негерметичности на поверхности бака (или емкости) и на испытательной арматуре. Испытания проводятся в помещении цеха на участке испытаний, который должен быть оборудован защитными броневыми щитами, камерами, боксами и другими средствами безопасности. Испытания крупногабаритных емкостей производятся в специальных стендах. На рис.9.1 в качестве примера приведена схема одного из вариантов выполнения гидростенда, а на рис.9.2 представлена схема установки дистанционного автоматического управления процессом гидроиспытаний.

Стенд состоит из установочной площадки *1*, которая опирается на рычажные весы (как правило, процесс испытания совмещают с тарировкой бака). Установочная площадка охвачена решетчатым ограждением *2* в целях обеспечения безопасности проводимых работ. На каркасе ограждения (с внутренней стороны) предусмотрено несколько ярусов откидных рабочих площадок *3*, предназначенных для монтажа необходимой арматуры на испытуемом баке *6*, а также для последующего осмотра бака при испытаниях. К гидростенду относятся также технологические емкости *4*, наполненные раствором ингибитора, и насосная станция *5* для перекачки жидкости в испытуемый бак и обратно в емкости и для обеспечения поддавливания жидкости в момент испытания. Контроль за давлением в баке осуществляется по манометрам пульта, вынесенного из зоны испытаний. Манометры соединены с полостью бака металлорукавами (армированными шлангами) высокого давления.

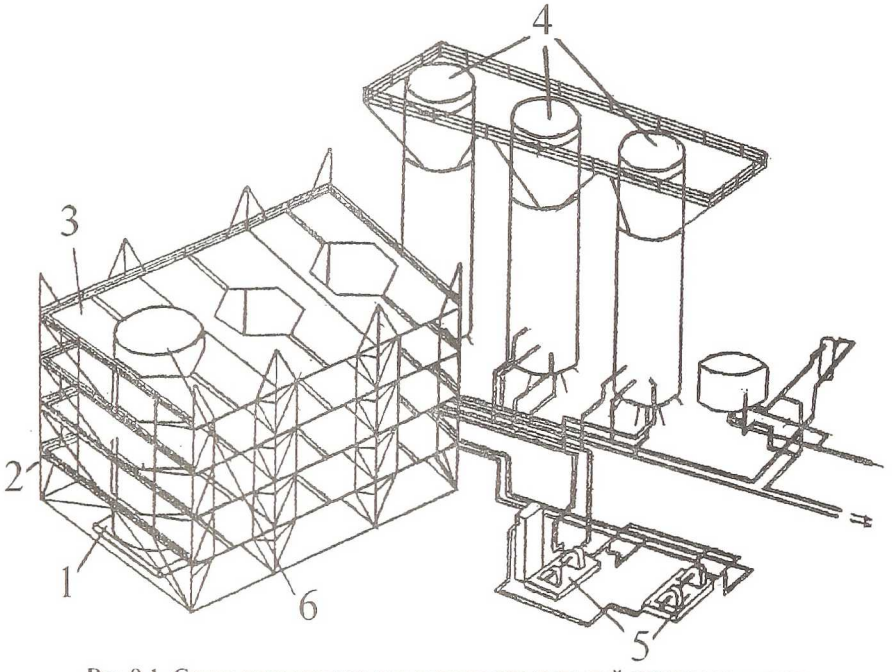


Рис.9.1. Схема гидростенда для испытания емкостей низкого давления

Порядок проведения испытаний на прочность заключается в следующем. После предварительного тщательного осмотра на отсутствие повреждений испытуемая емкость устанавливается на специальную подставку или на площадку гидростенда. Производится монтаж испытательной арматуры и заполнение бака жидкостью до появления её из штуцера для выпуска воздуха, после чего штуцер заглушают и начинают создавать избыточное давление в баке с помощью специального насоса. Вначале производится предварительная опрессовка под давлением $P_{ПРЕД}$=(0,1…0,2) $P_{РАБ}$, но не более $3 \cdot 10^3$ кПа в течение 2…3 мин для проверки плотности соединений. В случае наличия утечек давление сбрасывается, дефекты устраняются и производится повторное испытание. В случае отсутствия утечек давление доводится до $P_{ИСП}$ и производится выдержка под этим давлением в течение 10…15 мин, после чего давление сбрасывается до рабочего, при котором производится осмотр емкости. Емкость считается годной, если отсутствуют места течи и изменение объема емкости не больше допустимой по ТУ, что проверяется или мерной емкостью, или весовым методом (тарировка). После сброса давления и слива воды производится сушка емкости.

Испытания емкостей (баков) на прочность газом, применение которых в последнее время возрастает, производится при тех же испытательных давлениях и условиях, что и в первом случае. Емкос-

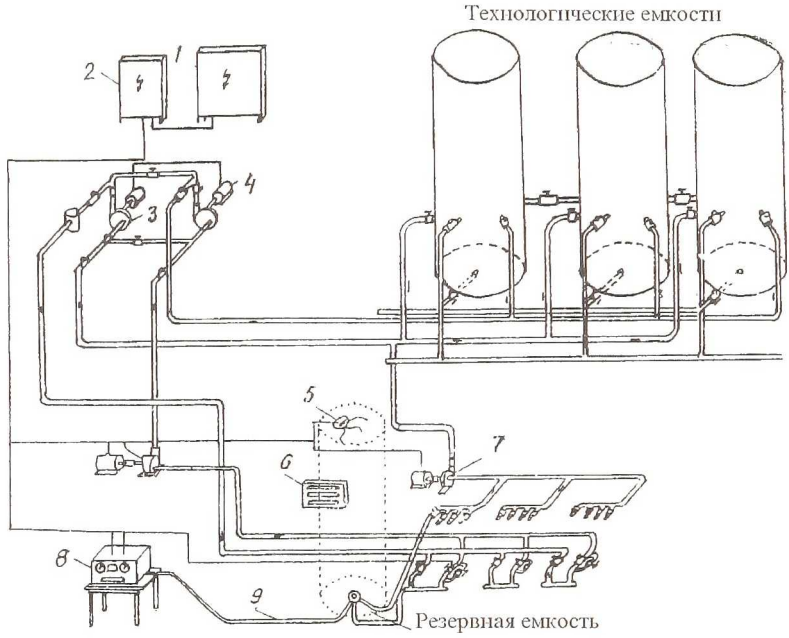


Рис.9.2. Схема управления установкой для гидроиспытаний:
1 силовой распределительный узел; 2 - шкаф с электрооборудованием; 3 - насос наполнения с электродвигателем; 4 насосы слива; 5 электроклапан; 6 световой транспарант; 7 - насос поддавливания; 8 - пульт; 9 - шланг

ти считаются годными, если отсутствуют падение давления, контролируемое манометром, в течение пяти минут (при отключенной системе наддува) и очаги негерметичности, определяемые по звуку истекающей струи воздуха. Осмотр емкости производится при рабочем давлении. В этом случае также контролируется изменение испытуемого объема.

Испытания на длительную прочность (длительная опрессовка) проводятся для некоторых ответственных емкостей ЛА, которые в процессе эксплуатации длительное время находятся под действием рабочего давления. Такие же испытания проводятся обычно на этапе ЧДИ, ИУП или при КВИ. Сущность их заключается в том, что емкость наполняется рабочей жидкостью или газом и выдерживается при рабочем давлении в течение времени, вдвое большем времени эксплуатации емкости под рабочим давлением. Эти испытания позволяют выявить дефекты и даже разрушения от коррозии под напряжением от ползучести, от водородной хрупкости и т.д., которые при обычных испытаниях могут остаться незамеченными. В некоторых случаях часть емкостей (при КДИ) подвергается рабочему давлению весьма длительное время (или до разрушения, или в 5...10 раз превышающее эксплуатационное время) [42].

Циклические испытания емкостей ЛА, так же как и испытания на длительную прочность, проводятся при отработке конструкции и технологии изготовления емкостей или при выборочных испытаниях и не проводятся при ПСИ. Сущность циклических испытаний заключается в повторно-статическом нагружении емкостей от атмосферного до испытательного давления с числом циклов нагружения равным числу циклов в процессе эксплуатации и приемных испытаний. Каждый цикл испытаний состоит из подъема давления до испытательного, выдержки при этом давлении в течение 2...3 мин, сброса давления до атмосферного и выдержки емкости при атмосферном давлении в течение 1...2 мин. Испытательное давление выбирается, как правило, равным рабочему, но в некоторых случаях, исходя из условий эксплуатации, режим испытаний может быть более сложным. Общее число циклов может достигать нескольких тысяч. При КДИ и ИУП циклические испытания могут проводиться до разрушения с целью определения максимального числа циклов, которое может выдержать данная конструкция емкости. Циклические испытания могут быть как гидравлическими, так и пневматическими. Годность емкости при циклических испытаниях определяется отсутствием течей и остаточных деформаций, поэтому они предшествуют испытаниям на герметичность.

Испытания на разрушение проводятся обычно для ограниченного числа емкостей в период постановки их на производство и при выборочных испытаниях. Обычно они проводятся гидравлическим давлением в режиме постепенного, иногда ступенчатого повышения давления. Испытания проводятся в специальных бронекамерах после проведения обычных ПСИ. При испытании емкость вначале выдерживается при рабочем или испытательном (1,15...1,4) $P_{раб}$ давлении, затем давление увеличивают до разрушения. Целью этих испытаний является определение реального запаса прочности данной партии емкостей. Значительное место в системе испытаний занимают динамические, а точнее, вибрационные и ударные испытания.

Вибрационные испытания емкостей являются обязательными для всех видов испытаний, кроме ПСИ, и определяются тем, что ЛА на всех стадиях эксплуатации подвергаются вибрационному воздействию в широком спектре частот. Целью виброиспытаний является проверка вибропрочности сохранения работоспособности после воздействия заданных вибраций в течение определенного времени, а также виброустойчивости правильного функционирования отдельных устройств и элементов емкостей в условиях действующих вибраций. В процессе виброиспытаний проверяются крепления штуцеров, прочность, герметичность и качество крепления диафрагм, воронкогасителей, заборных устройств, кронштейнов и т.д., вибропрочность самих корпусов (особенно сварных швов) емкостей. Поэтому после

виброиспытаний должны проводиться испытания на прочность и герметичность. При виброиспытаниях предел частот колебаний от 5 до 2000 Гц и перегрузок до 15...20 единиц.

Вибрационные испытания проводятся с заправленными емкостями и заглушенными штуцерами на вибростендах различной конструкции: электродинамических, электромеханических, электрогидравлических, гидравлических и т.д. Установленная емкость обезвешивается с помощью системы различных амортизирующих пружин. Режим задания частот колебаний может быть различным: дискретным в заданном пределе или методом "качающейся частоты", когда частота плавно изменяется во всем заданном диапазоне, а перегрузки изменяются дискретно, образуя ряд (10...15) ступенек, характеризующихся одним значением перегрузки и небольшим пределом частот колебаний. Как правило, виброиспытания емкостей проводятся в двух взаимно перпендикулярных направлениях и реже в трех направлениях. Годность бака определяется после испытания на прочность и герметичность.

Ударные испытания емкостей (испытания на ударную прочность) проводятся для проверки работоспособности емкости и её элементов после воздействия на неё значительных пиковых (часто многократных) перегрузок. Они проводятся или на специальных стендах, воссоздающих ударные нагрузки определенной перегрузки и времени воздействия, или сбросом емкости, помещаемой в специальный контейнер, с заданной высоты на металлическую или другую поверхность, характеризующуюся заданными упругими характеристиками. Режим ударных испытаний устанавливает направления и количество ударов, величины перегрузок и время воздействия. Режим испытаний может быть многоступенчатым. Годность емкости после ударных испытаний определяется целостностью емкости и её элементов, а также сохранением её работоспособности и герметичности [42].

9.3. Тарировка емкостей

Тарировка баков производится с целью определения полного объема, полезного объема, промежуточных объемов по мере расхода жидкости и объема обязательного остатка. Тарировка, как правило, совмещается с процессом испытания емкостей на прочность. Существуют два метода тарировки: объемный и весовой. В первом случае объем бака определяют с помощью тарировочной емкости, объем которой заранее известен. Во втором случае определение объема бака и его тарировка осуществляются взвешиванием, при этом процесс тарирования может производиться двумя способами: наполнением тарируемой емкости или сливом. В производстве эти способы называют "сухой" и "мокрый" Фиксация контрольных точек при сливе (или заполнении) рабочей жидкости производится с

помощью специальных датчиков уровня. Объем в каждый момент времени определяется по формулам:

для "сухого" способа $$V_i = \frac{m_i - m_0}{\rho_Ж} K_t \,, \qquad (9.1)$$

для "мокрого" способа $$V_i = \frac{m_П - m_0 - m_i}{\rho_Ж} K_t \,, \qquad (9.2)$$

где m_0 масса сухого бака; $m_П$ масса бака с полным объемом жидкости; m_i - масса бака в любой момент тарировки; $\rho_Ж$ - плотность жидкости, которая используется в испытаниях (при нормальной температуре); K_t поправочный коэффициент, учитывающий температурные колебания в момент испытания.

Для пересчета полученных результатов на реальные условия эксплуатации бака данные замера при тарировке корректируются на поправочный коэффициент, равный отношению удельных весов "штатной" рабочей жидкости и используемой в испытаниях.

9.4. Методы обеспечения чистоты внутренней поверхности баков-емкостей и их элементов

К бакам современных ЛА кроме требований высокой прочности, соответствия требуемому объему предъявляются также высокие требования по чистоте.

Обезжиривание и очистка внутренних полостей емкостей производится как вручную, так и с использованием специальных промывочных стендов. Применение того или иного способа определяется габаритными размерами баков, оснащенностью производства современными промывочными стендами и средствами контроля чистоты полостей баков и т.п. Ручной способ обезжиривания заключается в обычной протирке (при условии доступности) поверхности бака хлопчатобумажной салфеткой, смоченной растворителем, в качестве которого применяется бензин Б-70 и этиловый спирт. Применение спирта и бензина при обезжиривании имеет недостатки: токсичность, пожароопасность, возможность возникновения статического электричества. Эти растворители оказывают вредное воздействие на организм человека. Кроме того, окончательное обезжиривание изделий салфетками, смоченными бензином и спиртом, не дает качественного обезжиривания. Поэтому в последние годы стал применяться механизированный метод обезжиривания с применением поверхностно-активных моющих средств [36, 68, 74].

Механизированный метод обезжиривания обеспечивает механическое воздействие, циркуляцию, движение моющего раствора и необходимое повышение температуры. Механическое воздействие моющего раствора на промываемую поверхность осуществляется с

помощью устройства, головка которого представляет собой разъемные сферические корпуса с расположенными на них по экваториальному сечению форсунками. Такое расположение форсунок создает вращающий момент и соответственно максимальный моющий эффект. Промывку осуществляют различными моющими средствами, например, раствором ОП-7 на водной основе в концентрации 2...3 г/л с добавлением двухкомпонентного ингибитора. ОП-7 обладает эмульгирующим и диспергирующим свойствами, способствующими удалению масляных и жировых пятен и загрязнений.

Существует два способа контроля чистоты внутренних поверхностей: непосредственный и косвенный. Первый способ связан с непосредственным наблюдением контролируемой поверхности и определением степени её загрязнения. Однако этот способ может быть применен, главным образом, только на ранних этапах технологического процесса, например, при определении чистоты отдельных элементов баков: днищ, обечаек и т.д., когда имеется доступ к поверхностям. После того, как бак или другой элемент системы собран, непосредственное наблюдение поверхности становится невозможным и тогда применяются косвенные методы, когда о чистоте внутренних поверхностей судят по чистоте промывочных жидкостей.

В приборах для непосредственного контроля чистоты внутренних поверхностей типа ПУЛК (прибор универсального люминесцентного контроля) используется особенность органических веществ и минеральных масел светиться под действием ультрафиолетового облучения. Люминесценция масел в зависимости от их сорта может иметь голубой, синий или зеленый оттенок. С увеличением концентрации масла на изделии яркость светящегося пятна пропорционально возрастает, что позволяет судить о степени загрязнения изделия. Иногда для оценки степени обезжиривания используют эталон допустимого качества обезжиривания, который имеет такую степень обезжиривания, которая может быть достигнута в производственных условиях промывкой водным раствором ОП-7. Сравнения производятся по интенсивности люминесценции поверхностей бака и эталона.

Среди косвенных методов контроля различают следующие способы: визуальный, массовый, оптический и гранулометрический.

Наиболее простым является визуальный метод контроля, когда о чистоте рабочей жидкости судят с помощью простых приспособлений и мерительных средств или "на глаз" Например, производят слив жидкости после промывки через контрольный фильтр или хлопчатобумажную салфетку и отмечают наличие механических частиц (в виде "блесток"), которые не превышают 20...40 мкм. Визуальный контроль находит широкое применение в промышленности, так как может быть выполнен в течение 5...10 мин.

Более точным является массовый метод контроля, который выполняется в лабораторных условиях. Сущность его заключается в том, что проба промывочной жидкости (от 100 до 1000 $см^3$) пропускается через специальный лабораторный бумажный фильтр, который задерживает все частицы размером не менее 5 мкм. Затем этот фильтр просушивают, взвешивают и сравнивают с массой аналогичного чистого фильтра. Разница в массе характеризует среднюю концентрацию частиц в пробном объеме. Недостатками данного способа контроля являются: недостаточная точность, которая выражается в необъективной оценке общей загрязненности рабочей жидкости (прохождение частиц с размерами 5...8 мкм сквозь фильтр оценивается как их отсутствие); недостаточная производительность метода, требующая лабораторных условий оценки чистоты и т.п.

Оптический метод контроля чистоты рабочей жидкости после промывки емкости основан на эффекте Тиндаля эффекте рассеяния света в мутных средах, т.е. на измерении разности в поглощении направленного луча света в контролируемой и эталонной жидкостях. Изменение освещенности фиксируется фотоэлементом. Однако данный метод не позволяет оценить размеры и количество частиц, загрязняющих жидкость, поэтому проводят дополнительные измерения путем визуального подсчета с помощью микроскопа (что достаточно трудоемко и недостоверно).

Для решения задачи количественной и качественной оценки состава загрязняющих жидкостей в последние годы были созданы автоматические приборы, обеспечивающие гранулометрический анализ механических примесей [74, 75]. В таких приборах используют фотоэлектрический принцип определения размеров и подсчета твердых частиц.

9.5. Методы испытания баков-емкостей на герметичность

Одним из основных факторов, определяющих надежность работы ЛА в целом, является необходимая герметичность баков, емкостей, гидропневмотопливных агрегатов и системы ПГС.

Контроль герметичности баков-емкостей и агрегатов ПГС двигательной установки в производстве ЛА осуществляется различными методами. Выбор метода испытаний определяется необходимой чувствительностью, а также его производительностью, безопасностью и экономичностью.

Прежде чем приступить к рассмотрению отдельных методов испытаний, познакомимся с некоторыми понятиями и определениями.

Герметичность это непроницаемость соединений и стенок, ограничивающих объем, для газов и жидкостей. Герметичность характеризуется количеством газа (жидкости), проникающим в

систему (изделие) или вытекающим из неё в единицу времени, т.е. произведение объема, занимаемого газом (жидкостью), на изменение в нем давления в единицу времени после прекращения откачки или повышения давления [74].

Это можно выразить формулой для натекания или вытекания

$$Q = V\Delta P/\Delta t \ , \qquad (9.3)$$

где Q натекание или вытекание; V изолированный от откачки или натекания объем; ΔP - изменение в нем давления за время Δt.

Реализация любого процесса испытания на герметичность предполагает обязательным наличие трех элементов: объекта испытания, тракта течеискания и детектора (регистрирующей системы). Испытания проходят в определенных условиях: газообразной или жидкой среде, а также при различных способах реализации физического принципа детектирования, регистрации контрольного либо пробного вещества.

Контрольным веществом называют жидкость, газ или смесь газов, которыми заполняется объект при испытании на герметичность. Оно часто содержит в себе пробное вещество.

Пробное вещество газ или жидкость, которые при прохождении через тракт течеискания избирательно регистрируются детектором измерительного или анализирующего прибора.

Рабочее вещество жидкость или газ, которыми заполняется объем или система при эксплуатации.

Детектор (в течеискании) это устройство (средство) для обнаружения утечки контрольной либо пробной среды из объекта испытания.

Тракт течеискания путь, который проходит контрольное (пробное) вещество от объекта испытания к течеискателю.

В настоящее время в производстве ЛА и, в частности, при испытаниях баков-емкостей на герметичность, нашел применение ряд методов, основные из которых представлены в виде классификации, показанной на рис.9.3 [68].

Из рассмотрения классификатора видно, что все методы испытания синтезируются по групповому принципу построения, в свою очередь, методы разделяются на способы испытания с различными технологическими вариантами.

Группы методов объединяются по условиям реализации физического принципа детектирования (регистрирующей системы) и состоянию в объекте течеискания контрольной пробной среды.

Газогидравлические методы предусматривают заполнение объекта испытания контрольным газом, перенос утечки в гидравлический тракт течеискания и регистрацию её с помощью анализирующей (течеискательной) аппаратуры или индикаторных средств.

Рис.9.3. Классификация методов испытания на герметичность баков-емкостей

Манометрические методы позволяют проводить проверку герметичности объекта контрольным газом и количественную оценку утечки с помощью манометрических средств измерения.

Гидроаналитические методы предусматривают заполнение объекта испытания контрольной (пробной) жидкостью, массоперенос утечки в гидравлическом, газообразном тракте течеискания и регистрацию её анализирующим прибором, индикаторным средством либо течеискателем.

Газоаналитические методы предусматривают заполнение объекта испытания контрольным (пробным) газом, перенос утечки в газообразном тракте течеискания и регистрацию её анализирующей, течеискательной аппаратурой либо специальными индикаторами.

Методы испытания на герметичность различаются между собой по физическому принципу детектирования (регистрации) утечки контрольной либо пробной среды. В зависимости от параметров технологических процессов испытания, а также конструктивно-технологических параметров объекта методы испытания, не изменяя физической сущности реализации, могут иметь различные технологические разновидности. Способы испытания на герметичность технологические разновидности методов испытания, связанные с применением различных средств течеискания и испытательного оборудования. Например, масс-спектрометрический метод может

осуществляться как в условиях вакуума способ вакуумирования, так и в атмосферных условиях - способ щупа.

Способы испытания могут применяться в различных вариантах технологического процесса. Чувствительность метода (способа) испытаний минимальное значение утечки контрольного или пробного вещества, которое может быть надежно зарегистрировано детектором.

Газогидравлические методы и способы испытания на герметичность.

Пузырьковый метод. Этот метод предусматривает подачу контрольного газа (азота, воздуха и т.д.) и создание внутри объекта испытания (бака, емкости, баллона, шар-баллона и т.п.) избыточного давления.

Способ аквариума (рис.9.4). Объект испытания помещают в резервуар (аквариум) и обнаруживают течи по появлению воздушных пузырьков в жидкости. В качестве жидкости применяют 0,5% раствор калиевого хромпика в дистиллированной воде или раствор специальных ингибиторов коррозии в воде. Например, двухкомпонентный фосфатно-хромпиковый ингибитор состава: $Na_2Cr_2O_7$ 0,055 г/л, Na_2HPO_4 0,040 г/л. Этот ингибитор применяется при испытаниях конструкций из алюминиевых сплавов. Добавки хромпика и ингибиторов значительно снижают коррозионные свойства воды и обеспечивают высокое качество изделий после испытания.

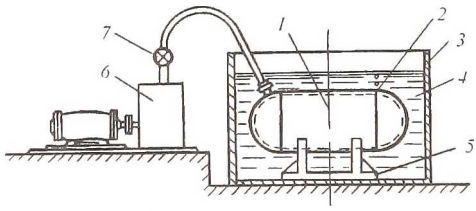


Рис.9.4. Способ аквариума:
1 испытываемый объект (емкость); 2 место течи - воздушные пузыри; 3 - аквариум; 4 - жидкость; 5 - технологическая подставка; 6 - компрессор; 7 - запорный кран

Пузырьковый метод позволяет не только находить места течей, но и судить об их величине по скорости образования и размерам пузырей.

Рассмотрение законов образования пузырей молекулярной физикой позволяет определить связь потока Q газа через течь с размерами и частотой образования пузырей. В самом деле силы, приводящие к образованию пузырька $P_{BH}=Qt/V$, должны преодолеть сопротивление всех сил, противодействующих этому образованию. Суммарное давление на пузырек извне складывается из трех составляющих: P_{AT} атмосферного давления; $P_{\Gamma}=\rho gh$- гидравлического давления столба жидкости, где ρ плотность жидкости, g ускорение свободного падения, h высота столба жидкости; $P_H=4\sigma/D$ капиллярного давления, обусловленного поверхностным натяжением окружающего пузырек слоя жидкости, где σ коэффициент поверхностного натяжения, D - диаметр пузырька.

Внутреннее давление в пузырьке $P_{BH}=Qt/V$ создается потоком газа Q через течь, натекающим в объем V пузырька за время t.

Равенство $P_{BH}=P_H+P_F+P_{AT}$ (9.4)

приводит к выражению для потока:

$$Q=\frac{\pi D_0^3}{6t_0}\left(\frac{4\sigma}{D_0}+\rho gh+P_{AT}\right), \quad (9.5)$$

где D_0 диаметр пузырька к моменту отрыва через время t_0 после образования.

Оценка показывает, что первый и второй члены суммы малы в сравнении с третьим, так что в реальных условиях испытаний поток газа через течь можно с достаточной точностью определить из уравнения

$$Q=\frac{\pi D_0^3}{6t_0}P_{AT} \quad (9.6)$$

или в более удобной для практики форме, поскольку $t_0=\Delta t/n$, где n число пузырьков, образующихся за время наблюдения Δt:

$$Q=\frac{\pi D_0^3 n}{6\Delta t}P_{AT} \quad (9.7)$$

Чувствительность описанного выше способа при применении открытого (не вакуумированного) резервуара, заполненного водой, находится в пределах $Q_{min}=1{,}33\cdot10^{-5}\ldots1{,}33\cdot10^{-6}$ м^3 Па/с. При вакуумировании и применении спирта чувствительность может быть повышена до $1{,}33\cdot10^{-7}$ м^{3}Па/с. Этот способ широко применяется при проверке герметичности малогабаритных баков, баллонов, а также трубопроводов и арматуры системы ПГС.

Метод дисперсных масс основан на свойстве индикаторной массы фиксировать места негерметичности с образованием в поверхностном слое пузырьков (вздутий или кратеров), возникающих от воздействия контрольного газа, выходящего через микродефекты испытываемого объекта (бака).

Способ обмыливания. Это наиболее простой, доступный и достаточно производительный способ испытания. Может применяться для испытания емкостей.

Способ обмыливания заключается в создании необходимого испытательного давления в емкости сжатым воздухом. Утечка определяется по изменению давления, фиксируемому по манометру, а место утечки с помощью пузыреобразования мыльной пены, нанесенной на поверхность испытываемого изделия. К качеству мыльной пены предъявляются повышенные требования. В производстве ЛА применяется "мыльная эмульсия незамерзающая" до температуры -40°С. Она представляет из себя раствор мыльного корня в дистиллированной воде с добавкой хлористого кальция. На 1 л

берется 100 г растертого в порошок мыльного корня. После нагрева до +80...+90°С в течение 4...5 ч и образования пены добавляется 40 г хлористого кальция и 30 частей кукурузного декстрина на 100 г мыльной эмульсии. Эмульсия должна давать обильную пену и сохраняться не оседая в течение 1 ч.

Отличие в закономерности образования пузырей на мыльной пленке по сравнению с их образованием при погружении изделия в жидкость определяется, во-первых, отсутствием в уравнении гидростатического давления и, во-вторых, повышенным капиллярным давлением P_H. Это давление для пузырей в газовой среде, окруженных двухсторонней пленкой $P_H=8\sigma/D$. Тогда уравнение течи можно записать в следующем виде:

$$Q=\frac{V\left(P_{AT}+P_H\right)}{t_0}=\frac{\pi D_0^3}{6t_0}\left(P_{AT}+\frac{8\sigma}{D}\right). \qquad (9.8)$$

Так как и здесь $P_H<<P_{AT}$, поток определяется тем же уравнением, что и для метода погружения:

$$Q=\frac{\pi D_0^3}{6t_0}P_{AT} \qquad (9.9)$$

Проводя испытания путем обмыливания поверхности, следует помнить, что устойчивость мыльных пузырей обеспечивается увеличением вязкости жидкости, а не её поверхностного натяжения. Вязкая жидкость медленно стекает под действием своего веса и утонение пленки происходит не так быстро. И наоборот, чем меньше σ, тем меньше сила, которая стремится разорвать пленку, и тем устойчивее пузыри. Чистая вода имеет большое σ и малую вязкость. Пена на ней не образуется. Растворение в воде мыла уменьшает коэффициент поверхностного натяжения и увеличивает вязкость. Образованию пузырей способствует растворение в воде яичного белка, желатина. Для увеличения вязкости мыльного раствора к нему можно добавлять глицерин.

К недостаткам метода обмыливания следует отнести: малую чувствительность (Q = 1,33·10^{-5} м^{3}Па/с); трудность контроля малодоступных для обзора мест; загрязнение мест обмыливания, что требует дополнительной операции по очистке изделий.

Способ индикаторных (дисперсных) масс. Контроль герметичности основан на применении специальных дисперсных масс различного цвета. Масса наносится на контролируемую поверхность или сварные швы изделия (емкости, бака и т.п.) с помощью мягкой кисти или пистолета-распылителя. Затем создается испытательное давление внутри изделия. Негерметичные места фиксируются во время визуального осмотра изделия по наличию скопления мелких пузырей в массе, которые сохраняются после сброса избыточного давления в

течение 0,5...1,0 ч, что позволяет производить испытания дистанционно.

Дисперсная масса долго не засыхает, так как её основой являются пенообразователи с широким температурным диапазоном работоспособности от +30 до -20°С. Она не вызывает коррозии металлов, не воспламеняется, не токсична, а также хорошо фиксирует течи до $6{,}65 \cdot 10^{-7}$ Па/с. После окончания испытания масса с контролируемых поверхностей легко смывается водой, ацетоном, фреоном-113 или стирается хлопчатобумажным тампоном. Масса сохраняет работоспособность в закрытой емкости в течение 6 месяцев.

Манометрические методы и способы испытания на герметичность.

При манометрическом методе проверки герметичности предусматривается заполнение (вакуумирование) проверяемого объекта контрольным газом (воздухом, азотом и т.д.), создание внутри объекта избыточного давления (вакуума) и выдержка в течение заданного времени. Оценка герметичности производится по времени падения или повышения давления на манометре с автоматической записью или по секундомеру.

Компрессионный метод проверки герметичности реализуется в производстве ЛА способом спада давления.

Способ спада давления предусматривает заполнение испытуемого объекта (бака, емкости и т.п.) воздухом, создание внутри объекта избыточного давления и выдержку в течение заданного времени. Оценка негерметичности при этом способе производится временем падения давления на манометре, которое определяется по секундомеру. Задавшись допустимым значением вытекания газа Q и зная объем V испытуемого отсека, можно определить допустимое время падения давления:

$$\Delta t = V \cdot \Delta P / Q \ . \qquad (9.10)$$

Этот способ применяется как предварительный для проверки баков-емкостей, пневмогидросистем и арматуры. Если скорость падения давления больше допустимой, место утечки устанавливается на слух с помощью слуховых трубок фонендоскопов или ультразвуковых течеискателей.

Вакуумный манометрический метод испытания на герметичность реализуется в производстве ЛА тремя основными способами: повышения давления в отвакуумированной полости, натекания в вакуумную камеру и сравнения с контрольной течью.

Способ повышения давления в отвакуумированной полости предусматривает создание вакуума внутри испытуемого отсека порядка 10^{-1} Па, выдержку отсека в течение заданного времени и определение величины натекания газа за этот период из окружающей

атмосферы [45]. При этом способе негерметичность оценивается натеканием газа в единицу времени по формуле

$$Q = 0{,}95\frac{(P_2 - P_1)V}{\tau}, \qquad (9.11)$$

где Q натекание газа из атмосферы (Па·м³/с); P_1 давление в начале замера, Па; P_2 давление в конце замера, Па; V - объем испытуемого отсека (бака); τ время между замерами (выдержка), с; 0,95 КПД азотной ловушки.

Чувствительность данного способа зависит от габаритных размеров и конфигурации контролируемых агрегатов ЛА и находится в пределах Q=1,33·10^{-5}...1,33·10^{-6} Па·м³/с.

Гидроаналитические методы контроля баков-емкостей на герметичность.

Гидроаналитические методы имеют достаточно высокую чувствительность порядка 1,33·10^{-5}...1,33·10^{-8} Па·м³/с, при этом в большинстве случаев не требуют сложного технологического оснащения и оборудования, отличаются простотой реализации при незначительных затратах труда.

Гидростатический метод предусматривает заполнение испытываемого объекта жидкостью (водой с хромпиком, керосином, маслом и т.д.), создание в объекте необходимого давления и выдержку в течение заданного времени. Оценка герметичности производится по наличию следов жидкости на поверхности объекта. Этих следов либо совсем не должно быть, либо допускается появление на поверхности бака-отсека в единицу времени установленного чертежом количества капель жидкости. При использовании указанного метода применяются несколько способов (рис.9.3).

Визуальный способ - определение мест неплотностей визуально, путем осмотра поверхности бака-отсека. При этом обеспечивается чувствительность проверки Q_{min}= 1,33·10^{-4}...1,33·10^{-5} Па·м³/с.

Способ фильтровальной бумаги определение наличия и мест неплотностей по пятнам на фильтровальной гигроскопической бумаге, накладываемой на внешнюю поверхность испытуемого объекта. При этом способе возможна приближенная количественная оценка герметичности путем замера диаметра пятна жидкости и определения времени вытекания жидкости по специальным тарировочным графикам. Чувствительность этого способа Q_{min}= 1,33×10^{-7}...1,33·10^{-8} Па·м³/с.

Способ меловой обмазки напыление или нанесение кистью на внешнюю поверхность бака-отсека жидкого мелового раствора и его сушка. В этом случае мельчайшие течи будут четко проявляться в виде темных пятен на поверхности высушенного мелового раствора.

Чувствительность проверки герметичности данным способом обеспечивается на уровне $1{,}33 \cdot 10^{-6} \ldots 1{,}33 \cdot 10^{-7}$ Па·м³/с.

Химический метод испытания основан на видимом эффекте вступления в химическую реакцию жидких пробных веществ с различными индикаторными средствами. При испытании баков-отсеков, топливных систем, трубопроводов и т.п., данный метод реализуется в основном двумя способами: хемсорбционным и хромоэффекта (метод проникающих жидкостей).

Хемсорбционный способ предусматривает заполнение объекта испытания рабочей жидкостью (компоненты топливных систем ЛА) под давлением, отбор паров рабочей жидкости с внешней поверхности объекта, их накопление в специальной камере и транспортировку к индикатору. Индикатор представляет собой прозрачную трубку с помещенным в неё специальным порошком, сорбирующим и реагирующим с парами рабочей жидкости. В качестве индикатора также применяют специальные ленты или индикаторную бумагу.

Чувствительность хемсорбционного способа находится в пределах $Q_{min} = 1{,}33 \cdot 10^{-5} \ldots 6{,}65 \cdot 10^{-6}$ Па·м³/с. Количественная оценка негерметичности проводится по видимому эффекту изменения цветности индикаторного порошка, находящегося в трубке определенной длины, в зависимости от потока газов рабочей жидкости.

Способ хромоэффекта нашел широкое применение в последнее время. Поэтому рассмотрим его более подробно. Сущность способа состоит в следующем: во время гидроиспытаний полости объекта испытания заполняются технологической жидкостью, представляющей собой водный раствор хромпика с технологическими добавками. Технологические добавки обеспечивают максимальную проникающую способность жидкости. На поверхность объекта испытания наносится индикаторная масса или лента, изменяющая свой цвет при взаимодействии с хромпиком.

Чувствительность метода при контроле герметичности сварных швов и целого материала $1{,}33 \cdot 10^{-6} \ldots 1{,}33 \cdot 10^{-7}$ Па·м³/с. Применение гидравлического метода контроля герметичности позволяет сократить общую продолжительность и трудоемкость испытаний, исключить применение сложного пневматического оборудования и резко повысить безопасность испытаний.

В основе люминисцентного метода лежит способность жидкостей, смачивающих стенки капиллярного отверстия, подниматься по каналу капилляра (рис.9.5). Предельная высота, на которую поднимается жидкость в капилляре, зависит от свойств жидкости и размеров канала и определяется по формуле

$$h = \frac{4\sigma \cos\Theta}{dg\left(\rho_{Ж} - \rho_{Г}\right)}, \qquad (9.12)$$

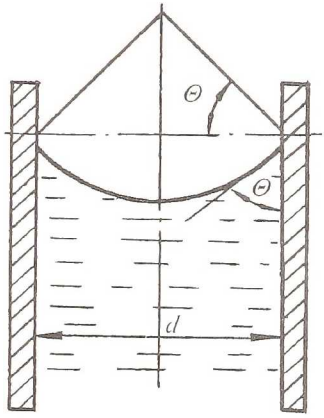


Рис.9.5. Схема подъема жидкости под действием капиллярных сил

где d диаметр капилляра; g ускорение свободного падения; $\rho_Ж$ и $\rho_Г$ - плотность жидкости и газа, заполняющих капилляр; σ коэффициент поверхностного натяжения жидкости; Θ краевой угол, характеризующий смачиваемость стенок капилляра жидкостью.

При $\cos\Theta<0$ жидкость не смачивает стенок капилляра и не поднимается по нему.

При люминесцентном методе контроля герметичности испытываемую конструкцию заполняют индикаторным пенетрантом. После выдержки конструкции в течение некоторого времени внешнюю поверхность её облучают ультрафиолетовыми лучами. В местах негерметичности наблюдается свечение, характерное для данного пенетранта, проникающего через микротрещины и микронеплотности. О степени негерметичности можно судить по времени появления свечения в местах неплотностей или по интенсивности свечения пенетранта. Чувствительность люминесцентного метода в значительной степени зависит от вида индикаторного пенетранта, который обычно представляет собой раствор люминофора в индикаторной жидкости. Из известных люминесцентных растворов наилучшей проникающей способностью обладают растворы на основе керосина, наихудшей - на основе воды.

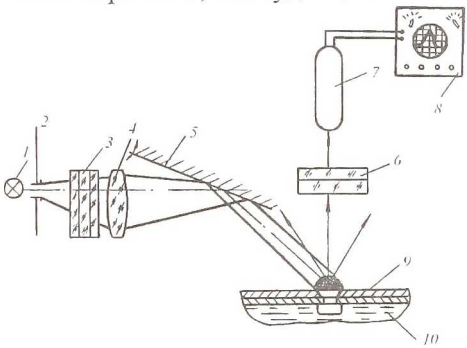


Рис.9.6. Способ флуоресцентного индикатора течи ФИТ-1

Проверка герметичности длинномерных трубопроводов и крупногабаритных баков-емкостей требует больших затрат времени и энергии. Поэтому для сокращения трудоемкости испытаний, а также для повышения объективности контроля и повышения чувствительности используют способ флуоресцентного индикатора течи ФИТ-1 (рис.9.6). Принцип его работы заключается в фиксировании линзой *4* на поверхности сканирующей линзы (зеркала) *5* светящейся точки и передаче её на фотоумножитель *7*. Попавший на фотоумножитель люминесцентный свет от дефекта (течи) вызывает электрический сигнал, который

усиливается и фиксируется на экране осциллографа или записывается на ленте. В этом случае на экране или ленте осциллографа будет четко виден пик от выявления негерметичности.

Рассмотрим порядок контроля герметичности с помощью ФИТ-1 на примере бака кессона центроплана самолета. Объект испытания заполняют водным раствором флуоресцирующего вещества уранина (0,01% по объему воды). Выходящий на поверхность объекта *9* уранин облучается ультрафиолетовым светом от источника *1*, проходящим через коллиматор *2*, оптический фильтр *3* и фокусирующую линзу *4*, которая фиксирует на поверхности зеркала *5* светящуюся точку и передает её на фотоусилитель-регистратор *7* через оптический фильтр *6*.

Прибор ФИТ-1 представляет собой однолучевую электронно-оптическую систему, которая позволяет при передвижении по объекту *10* одновременно сканировать возбуждающим лучом в поперечном направлении по контролируемым участкам и непрерывно регистрировать отраженный луч на индикаторном приборе *8*. Перемещение ФИТ-1 по поверхности объекта осуществляется оператором на специальной тележке со скоростью 0,05 м/с. Чувствительность способа не менее $Q_{min}=6{,}65\cdot10^{-7}$ Па·м³/с.

Газоаналитические методы испытания баков-емкостей на герметичность.

Эти методы проверки герметичности предусматривают заполнение объекта испытания чувствительным пробным веществом (гелием, фреоном, аммиаком, радиоактивным изотопом и т.д.) или смесью пробного вещества с контрольным веществом (азотом, воздухом и т.д.). Оценка герметичности производится посредством специальных устройств газоанализаторов.

Эти методы имеют высокую чувствительность порядка $Q_{min}=1{,}33\cdot10^{-8}\ldots1{,}33\cdot10^{-12}$ Па·м³/с, требуют применения сложного и дорогостоящего оборудования и значительных затрат труда.

Наиболее универсальным и широко применяемым методом испытания баков-емкостей на герметичность, обладающим высокой чувствительностью, **является масс-спектрометрический метод**. Масс-спектрометрия представляет собой метод разделения по массам сложной смеси газов или паров с помощью электрических и магнитных полей.

Масс-спектрометрический течеискатель это газоанализатор, настроенный на регистрацию содержания одного пробного газа в газовой смеси. В большинстве случаев пробным газом служит гелий.

Масс-спектрометрический анализ сводится к следующим процессам, происходящим в условиях высокого вакуума:

- превращение анализируемых молекул в положительные ионы с зарядом *e*;

- создание моноэнергетического ионного пучка посредством ускорения ионов продольным электрическим полем;
- расположение ионного пучка на компоненты по значениям *m/e*, где *m* - масса заряженной частицы;
- регистрация и измерение интенсивности выделенного ионного луча с определенным *m/e*.

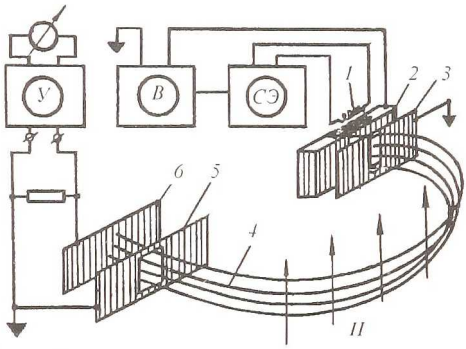


Рис.9.7. Схема действия масс-спектрометра: 1 -катод; 2 - коробка ионизатора; 3 - входная диафрагма; 4 ионный луч; 5 выходная диафрагма; 6 коллектор; Н направление магнитного поля; СЭ стабилизатор эмиссии; В - выпрямитель (разгоняющее напряжение); У - усилитель ионного тока с выходным прибором

Все указанные процессы осуществляются в трех основных узлах масс-спектрометра (рис.9.7). В ионном источнике *1*, *2* происходит ионизация газа и формирование ионного пучка *4*, который в анализаторе разделяется по массам. Выделенный пучок ионов с определенным *m/e* воспринимается регистрирующим устройством *6*, измеряющим его интенсивность.

Испытания изделий на герметичность с помощью масс-спектрометрического течеискателя производится под вакуумом. Течеискатель своей вакуумной полостью соединяется с испытываемой системой, обдуваемой или опрессованной пробным газом. Частицы пробного газа, проникшие через течи в систему, попадают в масс-спектрометрическую камеру течеискателя и индуцируются.

Основным элементом масс-спектрометра является его ионно-оптическая система - анализатор.

В ионном источнике масс-спектрометра газы, поступающие из испытуемого объекта, в том числе и пробный, ионизируются для того, чтобы подвергнуться разделению в магнитном анализаторе. В однородном магнитном поле *H* могут быть разделены по массам ионы, обладающие одинаковой энергией е.

В качестве источника для получения моноэнергетического пучка заряженных частиц наиболее широкое рапространение получил источник с накаленным катодом, предложенный Ниром (рис.9.8).

В источнике Нира накаленный вольфрамовый катод *K* излучает электроны, которые фокусируются магнитным полем Н и ускоряются электрополем, приложенным между катодом и камерой

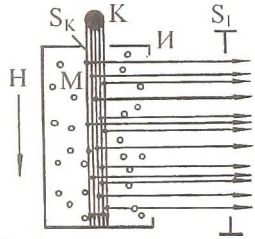


Рис.9.8. Принцип действия масс-спектрометрического прибора:

К - катод; И - коробка ионизатора; S_1 - входная диафрагма; H - направление магнитного поля; S_k входная щель для электронов; М молекулы газовой смеси

ионизатора И. В камеру ионизатора поступает газ, подлежащий анализу. Сталкиваясь с молекулами М этого газа, электроны ионизируют их. Образовавшиеся ионы вытягиваются из камеры, фокусируются в пучок и ускоряются в область ионизатора с помощью системы линз.

Анализ газов, подвергшихся ионизации, производится путем разделения ионов по массам в постоянном магнитном поле. В приборах со 180° фокусировкой ионы, образовавшиеся в источнике с энергией, соответствующей приложенной разности потенциалов Н (несколько сотен вольт), слабо расходящимся пучком выходят из входной щели источника S_K и попадают в магнитный ионизатор, где происходит разделение ионов по массам. В однородном поперечном магнитном поле анализатора, свободном от электрических полей, под действием Лоренцовой силы ионы будут перемещаться по окружностям, радиус которых

$$R = \frac{mV}{eH} \qquad (9.13)$$

зависит от массы m движущихся частиц и их заряда e (скорость V определяется разностью потенциалов источника). Поэтому происходит разделение ионного пучка сложного состава на ряд пучков с фиксированным отношением m/e. Поставив на пути одного из них коллектор ионов, можно измерить интенсивность пучка, служащего мерой концентрации определенных частиц в смеси газов. Место расположения коллектора на круговой траектории определяется условиями фокусировки. Упомянутая ранее зависимость, определяющая радиус траектории частиц в магнитном анализаторе, может быть приведена к практически более удобному виду

$$R = \frac{181}{H}\sqrt{MU}\ , \qquad (9.14)$$

где R - радиус круговой траектории, м; H - напряженность магнитного поля, А/м; U ускоряющее напряжение, B; M эффективная масса, равная отношению массового числа частиц к числу её электрических зарядов.

Коллектор, воспринимающий выделенный пучок ионов, соединяется с землей через высокоомное сопротивление, на котором самые слабые точки создают значительное падение напряжения, достаточное для последующего усиления и индикации.

Для работы с масс-спектрометрическими течеискателями в качестве пробного газа обычно выбирается гелий, обладающий

следующими достоинствами. Большая чувствительность течеиска-теля получается вследствие малого содержания гелия в атмосфере ($5 \cdot 10^{-4}$ %) и среди газов, выделяемых стенками аппаратуры. В результате этого подлежащий регистрации сигнал появляется на малом фоне (фон-показания, определяемые наличием газа гелия в остаточных газах). Упрощение конструкции масс-спектрометра при работе с гелием определяется его малым атомным весом. Эти преимущества гелия удачно сочетаются с его высокой проникающей способностью и химической инертностью, делающей применение его совершенно безвредным и безопасным в работе.

Течеискатель ПТИ-10 является в настоящее время последней более совершенной модификацией по сравнению с широко применяемым прибором ПТИ-7 и предназначен для испытания на герметичность различных объектов и систем масс-спектрометрическим методом. В течеискателе имеется стрелочный индикатор течи, акустический индикатор с регулировкой громкости и световой индикатор. При внезапном повышении давления в вакуумной системе течеискателя срабатывает вакуумная блокировка отключается канал ионного источника масс-спектрометрической камеры (МСК).

Прибор работает следующим образом: испытываемый объект, присоединенный к течеискателю, обдувается пробным газом (гелием); частицы гелия, проникшие через течь и дросселирующий вентиль в вакуумную систему течеискателя, попадают в камеру масс-спектрометрометра. Здесь, в ионном источнике камеры, газы, в том числе и гелий, ионизируются за счет бомбардировки электронами, испускаемыми накаленным катодом. Между ионизатором и диафрагмой ионного источника приложена ускоряющая ионы разность потенциалов (ускоряющее напряжение). С энергией, соответствующей приложенной разности потенциалов, ионы выходят пучком через щель диафрагмы в магнитный анализатор, где происходит разделение ионов по массам. В магнитном поле частицы, обладающие начальной энергией, движутся по круговым траекториям, радиус которых при неизменном магнитном поле зависит от их массы и энергии. Устанавливая определенное ускоряющее напряжение, можно настроить масс-спектрометр так, что на коллектор ионов, помещенный в камере под углом 180° к ионному источнику, будут попадать только ионы гелия (настройка на "ПИК" гелия). Чтобы одновременно с ионами гелия на коллектор не попадали ионы других масс, потерявших энергию в результате столкновений и случайно попавшие на рабочую траекторию, перед коллектором помещается супрессор-подавитель фона.

На одну из сеток супрессора подается потенциал, тормозящий пролетание ионов. Лишь ионы, обладающие полной энергией, оказываются в состоянии преодолеть этот потенциальный барьер и

попасть на коллектор. Попавшие на коллектор ионы деионизируются на нем, вызывая протекание тока по сопротивлению в цепи коллектора. Малая сила ионных токов приводит к необходимости применять весьма большое сопротивление (порядка $10^{11}...10^{12}$ Ом), чтобы падение напряжения на нем было достаточным для дальнейшего его усиления. Коллектор ионов соединен со входом электрометрического каскада усилителя постоянного тока. Изменения ионного тока регистрируются стрелочным прибором блока измерения ионного тока, звуковым и световым индикаторами.

Для контроля чувствительности течеискателя служит калибровочная гелиевая течь (гелит). Рабочее давление в МСК обеспечивается откачной системой, состоящей из пластинчато-роторного и паромасляного насосов и азотной ловушки, защищающей камеру от замасливания. Контроль давления в линии предварительного разряжения и в высоковакуумном объеме течеискателя осуществляется с помощью манометрического преобразователя ПМТ-4М и вакуумного датчика. Управление вакуумной системой течеискателя при его включении, выключении и работе производится с помощью клапанов. Блокировка защищает течеискатель от выхода из строя при внезапном отключении от сетевого напряжения.

Способ вакуумирования. Проверяемое изделие помещается в вакуумную камеру. Изделие (бак, емкость, баллон и т.п.) заполняется гелием или смесью с воздухом и в нем создается предусмотренное избыточное давление. В вакуумной камере создается необходимый вакуум. Через определенное время с помощью течеискателей ПТИ-7, ПТИ-10 производится оценка количества гелия, вытекающего из изделия в вакуумную камеру. Этот способ в зависимости от формы, габаритов проверяемого изделия, требований герметичности применяется в нескольких технологических вариантах [51]: в стационарных вакуумных камерах; вакуумных камерах с принудительным накоплением; разъемных вакуумных камерах; местных вакуумных камерах (присосках).

Способ обдувания. В зависимости от габаритных размеров изделия применяется в двух вариантах: для крупногабаритных путем обдува швов гелием, а для узлов с малыми габаритными размерами (шар-баллоны) путем помещения их в гелиевую среду (камеру). В испытываемом объекте создается заданный конструкторской документацией вакуум. Если в швах испытываемого бака имеются течи, то через них внутрь него проникает гелий и с помощью течеискателей по его количеству оценивается герметичность. Способ обдува крупногабаритных баков применяется редко, так как вызывает большой расход гелия и, следовательно, загазованность цеха. Чувствительность до $1{,}33 \cdot 10^{-7}$ Па·м^3/с. Способ помещения в гелиевую среду (камеру) широко используется для малогабаритных изделий (мелкие баки, трубо-

проводы и т.д.), а накопление гелия внутри изделия в течение нескольких часов обеспечивает высокую чувствительность до $1{,}33 \cdot 10^{-9}$ Па·м³/с.

Способ "щупа" Контроль герметичности способом "щупа" заключается в том, что во внутреннюю полость изделия подается контрольный газ под избыточным давлением. После подачи давления и выдержки изделия в течение определенного времени медленно, со скоростью 0,5...1 см/с, щупом (трубкой с капиллярным отверстием) проводят по контролируемым местам. Щуп через гибкий шланг подсоединен к входному патрубку прибора течеискателя. Через наконечник щупа пробный газ засасывается в вакуумную систему течеискателя и попадает в масс-спектрометрическую камеру. При наличии утечки контрольного газа через разъемные уплотнения или сварные швы изделия прибором фиксируется повышенное содержание гелия по сравнению с его концентрацией в чистом атмосферном воздухе. О течи судят по отклонению стрелки прибора и изменению тембра звукового сигнала.

Способ накопления при атмосферном давлении. Этот способ применяется для контроля гидрогазовых систем ЛА и их элементов (соединений, узлов, агрегатов). Он обладает высокой чувствительностью к натеканиям порядка $Q_{min}=1{,}33 \cdot 10^{-9}$ Па·м³/с при масс-спектрометрических испытаниях. Кроме того, имеется возможность проверки сплошности материала узлов и деталей, агрегатов сложной конфигурации с плохим доступом к местам возможных утечек. Этот способ менее опасен, так как позволяет производить оценку герметичности по окончании процесса накопления при пониженном или сброшенном давлении. рис 6.2-7

Способ накопления заключается в следующем. Вокруг проверяемого объекта создается замкнутый герметический объем накопления, изолированный от откачки. Проверяемый объект заполняется под определенным давлением гелием. При наличии неплотностей в проверяемом объекте гелий проникает в замкнутый объем накопления, повышая в нем концентрацию и парциальное давление гелия. Путем ввода в объем накопления с шагом 50...350 мм щупа-натекателя с иглой Льюера, соединенного шлангом с течеискателем ПТИ-10, регистрируется наличием пробного газа гелия. Чем больше негерметичность изделия и время накопления, тем большая концентрация гелия создается в объеме накопления. Необходимое время накопления составляет 5...120 мин и обуславливается чувствительностью течеискателя.

Конструкция объема накопления может быть выполнена в виде металлического кожуха, камеры или чехла из герметической пленки или ткани и в зависимости от его форм и размеров (ширины, высоты, зазора между поверхностями) должна предусматривать возможность замера концентрации пробного газа в нескольких

точках (зонах) объема накопления с шагом не более 350 мм. Нужно стремиться к тому, чтобы объем был минимальный, а зазор равномерный.

Химический метод реализуется пособом остаточных устойчивых следов (ОУС). Способ ОУС основан на использовании химической реакции для обнаружения мест утечки контрольного газа из изделия. Сущность его заключается в том, что на проверяемые поверхности и соединения наносится желеобразная масса в виде эластичной пленки, а объект испытания заполняется контрольным газом под избыточным давлением. Контрольным газом является смесь воздуха с аммиаком.

Индикаторная масса представляет собой водный раствор агар-агара, глицерина и индикатора крезолового красного. Агар-агар пищевой продукт, содержащий 90% углеводов, 2...3% белков и 3...5% золы, получаемый из морских водорослей. Он добавляется в массу как желеобразующее вещество. Благодаря агар-агару масса хорошо сцепляется с поверхностью изделия. Наличие глицерина улучшает её технологические свойства и увеличивает термостойкость. Кислотно-основной индикатор крезоловый красный представляет собой органическое соединение в виде кристаллов. Он применен в двух видах: водорастворимый и спирторастворимый. Интервал перехода окраски характеризуется водородным показателем pH=7,2...8,8. Нейтральное состояние янтарно-желтый цвет. При щелочной реакции малиновый цвет.

В качестве контрольной газовой смеси применяется 1% смесь аммиака и воздуха (по объему). Сжатый воздух должен иметь точку росы не выше -55°С и влажность не более 0,04%. Аммиак растворяется в воде и образует щелочное соединение в виде NH_4OH. При этом изменяется водородный показатель индикаторной массы, в результате происходит изменение окраски индикаторной массы. NH_4OH- неустойчивый продукт и нуждается в постоянном присутствии аммиака. Минимальная устойчивость малиновых пятен после прекращения контакта индикаторной массы с контрольным газом равна 15 мин.

Устойчивость следов течей позволяет осуществить контроль герметичности изделий без присутствия обслуживающего персонала в момент создания высокого давления. Эта особенность метода устраняет потенциальную опасность для обслуживающего персонала на случай аварии изделия.

9.6. Техника безопасности при пневмоиспытаниях баков-емкостей

Испытания, связанные с использованием сжатого воздуха, относятся к числу особо сложных и опасных. Эти испытания могут

сопровождаться разрушением испытуемых изделий, образованием осколков и взрывной волны. Безаварийная и безопасная работа при пневмоиспытаниях зависит от технической подготовленности рабочих и инженерно-технического состава, соблюдения ими технологического режима, правил и инструкций по технике безопасности.

Пневмоиспытания проводят на специальных установках-стендах, к которым предъявляют особые требования в отношении прочности и надежности. В зависимости от произведения испытательного давления $P_{МПа}$ на объем полости испытываемого изделия $V_{м^3}$ пневматические испытания по степени опасности подразделяются на несколько групп.

Пневмоиспытания изделий при величинах $PV \leq 0{,}3$ МПа·м^3 проводятся на стендах, которые разрешается размещать в производственных зданиях при наличии других производственных процессов. Установки при $PV > 0{,}3$ МПа·м^3, но $< 2{,}5$ МПа·м^3, как правило, размещают в изолированных помещениях, при $PV > 2{,}5$ МПа·м^3 установки располагаются на испытательных станциях, удаленных от других производственных помещений.

Проектирование пневмоустановок (стендов) производится специальными проектными организациями или службами предприятия. Испытательный пневмостенд принимается в эксплуатацию специальной комиссией. Испытательные пневмоустановки (стенды) подвергаются периодическим освидетельствованиям, которые проводятся в соответствии с графиками не реже одного раза в год. Пневматические испытания на установках проводят с обязательным применением защитных устройств.

В зависимости от габаритных размеров испытываемых изделий и давления применяют следующие виды защит: бронеколпаки, бронешкафы, бронекабины, бронекамеры и боксы.

К работе на пневмоустановках допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие медосмотр, техническое обучение и имеющие удостоверение на право работы со сжатым воздухом, с ежегодной переаттестацией.

Пневмоиспытания проводят строго по технологическим программам или процессам в соответствии со схемой испытаний под руководством ответственного за испытание, назначенного из числа инженерно-технического состава. Проводить испытания разрешается только на исправном и принятом в эксплуатацию оборудовании с защитными устройствами, системами блокировки и сигнализации при строгом соблюдении правил и требований техники безопасности. К подготовке и проведению пневмоиспытаний допускаются только работники, обслуживающие испытательную установку. Допуск посторонних лиц на установку запрещен.

10. КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ ПРИВОДНЫХ МЕХАНИЗМОВ

10.1. Испытание механизмов на срабатывание

Испытаниям на срабатывание подвергаются клапаны, пиротолкатели, антенны, солнечные батареи, системы отделения, приводы, системы раскрытия и сброса головного обтекателя, посадочные устройства и др.

Испытания проводятся в цехах узловой, агрегатной и общей сборки в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации [71]. Имитировать условия космического пространства, особенно невесомости, сложно и дорого, кроме того, конструкции, работающие в условиях открытого космоса, имеют малую жесткость и прочность, приводы раскрывающихся элементов обладают минимальной мощностью. Эти условия не позволяют производить наземную отработку без применения систем обезвешивания. Выбор системы обезвешивания определяется кинематикой раскрывающегося звена, динамическими его характеристиками, требуемой точностью обезвешивания, числом испытываемых изделий и др.

В соответствии с принципом действия возможны различные системы обезвешивания: на воздушных опорах; на электромагнитной подвеске; на аэростатической подвеске; на гидросреде; в самолетах, летящих по специальной траектории; механические с применением тросов, пружин, роликов, рычагов, шарниров и др. Создавая систему обезвешивания, необходимо стремиться не просто заставить сработать узел или агрегат за счет приложения определенных сил, а обеспечивать возможность создания этой силы самому исполнительному механизму узла или агрегата (например, сжатой пружине, закрученному торсиону).

Система обезвешивания должна обеспечивать создание равнодействующей силы, уравновешивающей силу веса объекта, приложенного к центру его масс. Кинематика системы должна сохранять значение и направление равнодействующей силы в течение всего процесса отработки.

В условиях опытного и мелкосерийного производства наибольшее распространение получили простые механические системы обезвешивания. Они достаточно универсальны, легко переналаживаемы, оказывают минимальное влияние на объект испытания, надежны при отработке в условиях изменения температур и давления. Устройства и механизмы, компенсирующие воздействие гравитационного поля Земли на элементы конструкции изделия, обычно включают в себя устройство, создающее заданные силы и момент, и

устройство, обеспечивающее передачу этой силы или момента конструкции изделия, подлежащего отработке.

Устройства, создающие силу или момент, бывают выполнены: с амортизатором (рис.10.1, а); с помощью противовесов (рис.10.1, б); с помощью гидро- или аэростатических устройств (рис.10.1, в); с помощью устройств, использующих силы упругих деформируемых тел (рис.10.1, г); с помощью шарнирно-рычажных устройств (рис.10.1, д); с помощью роликов (рис.10.1, е); с помощью аэродинамической силы постоянной струи воздуха и др.

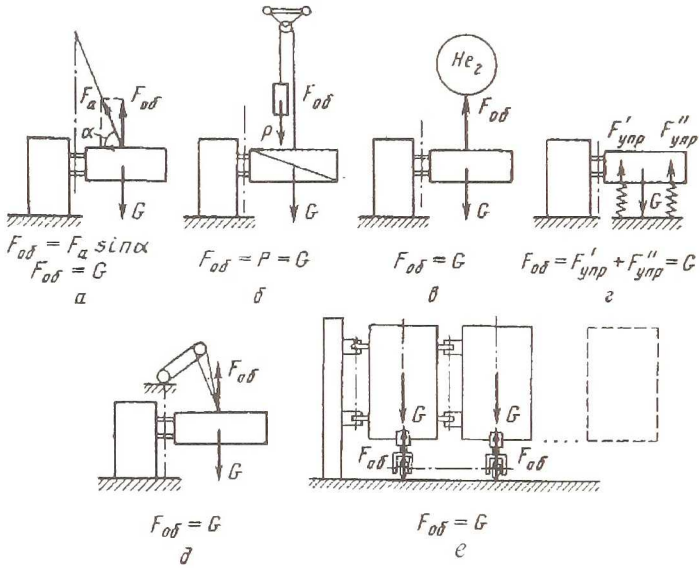


Рис.10.1. Конструктивные схемы устройств для обезвешивания

В качестве примера рассмотрим технологические процессы испытания солнечной батареи (СБ) и механизма раскрытия головного обтекателя. СБ состоит из каркасов панелей, предназначенных для установки фотопреобразователей, из шести секций каждая. Каждая секция состоит из двух каркасов: основного и откидного. Все каркасы в сложенном положении имеют типовую зачековку к основному каркасу пирочекой. Каждая панель со сложенными зачекованными откидными каркасами секций свертывается на ферму и зачековывается к ферме пирочекой. Ферма стопорится к приборному контейнеру пирочеками. Перед установкой на каркас фотопреобразователей необходимо каждый комплекс СБ подвергнуть испытаниям. СБ должна быть работоспособна и сохранять свои параметры после тридцатикратного срабатывания в пределах требований ТУ в условиях невесомости и вакуума после воздействия в зачекованном положении, вибрационных и линейных нагрузок и температур [71].

Сначала проводится проверка работоспособности стопоров фермы к приборному контейнеру. Приборный контейнер наддувается до давления $0{,}125^{+0{,}05}$ МПа. Проверка производится в вертикальном положении фермы, один раз при установке фермы по полету, второй раз с поворотом фермы на 180° (против полета).

Затем производится обезвешивание СБ на специальном стенде. Опоры обезвешивания должны быть оттарированы по фактической массе, взятой из паспорта секций с точностью ±0,25 кг. Тарировка заключается в настройке силы упругости пружины, являющейся обезвешивающим элементом опоры, на заданное значение, определяемое из диаграммы раскрытия откидных каркасов СБ с учетом действительного веса откидных каркасов, все проверки производятся с зачековкой пирочеками. Зачековка стопоров фермы к приборному контейнеру производится технологическими чеками - электрическими или пневматическими.

СБ с пристыкованной к приборному отсеку фермой устанавливают на стенде обезвешивания вертикально (точность ±15'), устанавливают опоры обезвешивания на панелях СБ (рис.10.2), подают давление в пирочеки зачековки разворота панелей. Правая и левая панели должны одновременно свободно, без заеданий, развернуться и застопориться стопорами. Измеряют время разворота панелей.

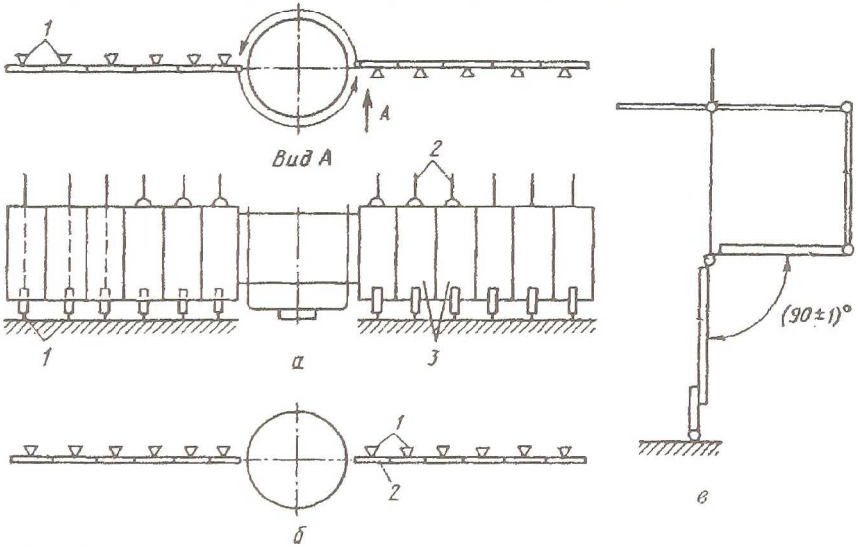


Рис.10.2. Положение опор обезвешивания СБ (вид против полета):
а - в развернутом положении: 1 - опоры обезвешивания панелей СБ; 2 - качалки обезвешивания откидных каркасов секций; 3 - секции панелей СБ в свернутом положении; б - перед раскрытием откидных каркасов секций: 1 - опоры обезвешивания панелей; 2 - откидные каркасы секций; в - положение откидных каркасов секций в обезвешенном положении

Переставляют поочередно опоры обезвешивания на правой панели СБ с откидных на основные части. Перестановка опор обезвешивания на основные части производится для освобождения откидных частей СБ и обеспечения возможности монтажа качалок обезвешивания. Тарируют и устанавливают качалки обезвешивания (рис.10.3) на откидные каркасы секций панелей СБ. Подают давление в чеки раскрытия откидных каркасов секций. Все откидные секции панелей должны раскрыться и встать на защелки.

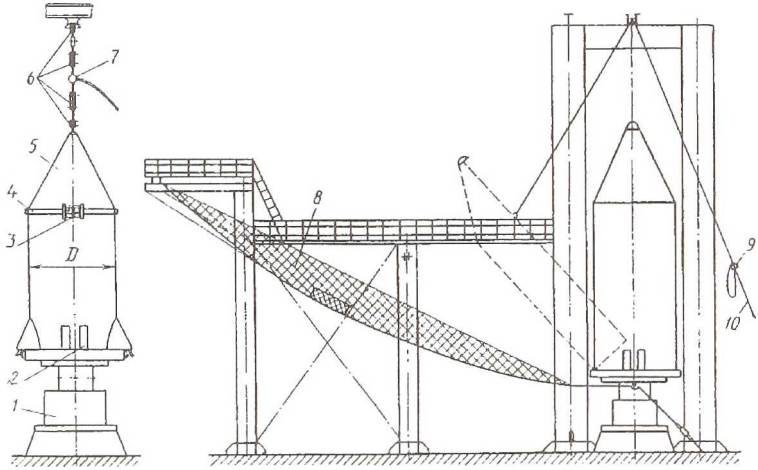


Рис.10.3. Схема стенда для отработки раскрытия обтекателей

Отсоединяют шланги подвода сжатого воздуха от чек. Снимают качалки обезвешивания с откидных каркасов секций. Открывают защелки откидных каркасов секций, закрывают откидные каркасы секций и зачековывают их пирочеками. Свертывают правую и левую панели СБ на ферму и зачековывают их пирочеками. Снимают опоры обезвешивания. Сбрасывают давление из приборного контейнера. Отстыковывают ферму с застопоренными на ней панелями от приборного контейнера.

Испытания головного обтекателя производятся на специальном стенде (рис.10.3). После установки изделия *5* и выполнения подготовительных работ испытывается механизм раскрытия панелей обтекателя, для чего к наконечнику обтекателя прикладывается осевая сила. В процессе испытания контролируется ход наконечника и осевая сила, их фактические значения заносятся в технический паспорт. Необходимость контроля хода наконечника связана с тем, что в реальных условиях верхнюю чашку обтекателя отстреливает пирозамок, ход штока которого имеет определенное значение. К чашке присоединены тяги, связанные с рычагами замков, стягивающих

панели обтекателя. Таким образом, если ход наконечника будет не в пределах допуска, то обтекатель не раскроется.

Для проведения испытания по отработке сброса панелей обтекателя отстыковывается цепь нагружения *6* и электрическая цепь измерения *7* от наконечника обтекателя, пристыковывается трос лебедки *10*, который крепится на панели. Проверяется и закрепляется электрический замок *9*. После завершения подготовки производится сброс половины обтекателя на страховочную сетку *8* в результате срабатывания электрического замка. Панели разводятся пружинными толкателями *2*, на которых в процессе отработки стоят ограничители, обеспечивающие раскрытие панелей на небольшой угол. Бандаж *4* с упругими амортизаторами *3* является дополнительным страховочным элементом в том случае, если ограничитель не срабатывает.

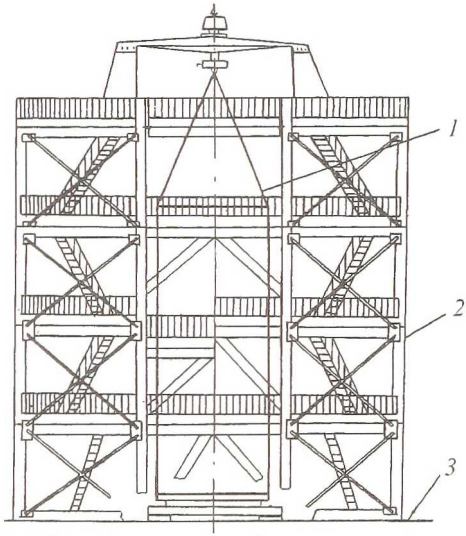


Рис.10.4. Стенд для обмера, настройки и раскрытия головного обтекателя:
1 головной обтекатель; 2 стенд; 3 уровень пола цеха

При отработке сброса панелей с бандажа отстыковываются амортизаторы. Электрический замок представляет собой защелку, через систему рычагов соединенную со штоком соленоида. При подаче на соленоид напряжения его шток втягивается и освобождает крюк электрозамка, в результате чего трос выходит из защемления. Панель освобождается и под действием собственного веса и пружинных толкателей сбрасывается на сетку. Для сброса второй половины обтекателя поворачивают планшайбу манипулятора 1 на 180°.

Раскрытие створок на угол 6...7° может проводиться и на универсальном стенде (рис.10.4). Проверка осуществляется с помощью системы страгивания и контроля определенной силы через динамометр, установленный на неподвижной балке.

10.2. Испытания рулевых машинок

Исполнительными элементами системы управления ЛА являются силовые приводы органов управления (как аэродинамических, так и газодинамических). Принципиальная схема силового привода показана на рис.10.5.

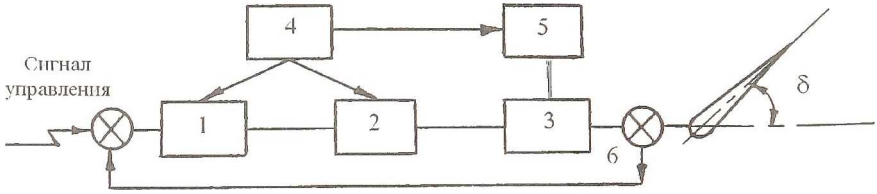


Рис.10.5. Типовая схема силового привода:
1 - блок усиления; 2 - узел управления; 3- силовой механизм; 4 - блок коррекции; 5 - привод силового механизма; 6 - обратная связь

Как видно из схемы, сигнал управления, полученный с потенциометра гироскопического прибора ЛА, усиливается блоком усиления и подается на узел управления, который в соответствии с командным током (его силой и направлением) перемещает силовой механизм. Последний, в свою очередь, отклоняет руль на определенный угол δ, что обеспечивается обратной связью.

Привод силового механизма может осуществляться с помощью электродвигателя и насоса или электромеханическим устройством. Чаще всего усилитель-преобразователь, узел управления, приводной двигатель и силовой механизм конструктивно выполняются в виде одного агрегата, называемого рулевой машинкой (РМ). РМ является исполнительным органом, преобразующим электрические сигналы во вращательное движение рулей. Поворот рулей осуществляется в нужную сторону и на определенную величину в зависимости от полученного сигнала с потенциометра гироскопического прибора.

По принципу действия различают следующие виды рулевых механизмов: пневматические, гидравлические, электромагнитные, электромеханические, электрогидравлические. Каждый из этих видов РМ имеет свои преимущества и недостатки.

Наибольшее распространение в конструкциях ЛА и КА получили электрогидравлические РМ. Они создают рабочее давление масла в гидравлическом силовом цилиндре, в котором размещен кривошипно-шатунный механизм, приводящий в движение рули изделия. Давление создается с помощью насоса, работающего от электродвигателя. Эти РМ обладают преимуществом гидравлических приводов (точность, безынерционность, быстродействие), надежны и имеют относительно небольшой удельный вес.

Принцип работы электрогидравлической РМ заключается в следующем. Сигнал, снятый с потенциометра гироскопа, преобразованный и усиленный в промежуточных устройствах автомата стабилизации, поступает на поляризованное реле РМ. Поляризованное реле в зависимости от знака сигнала поворачивает в ту или иную сторону коромысло и связанный с ним золотниковый распределитель, подвешенный на плоской пружине, заменяющей механический шар-

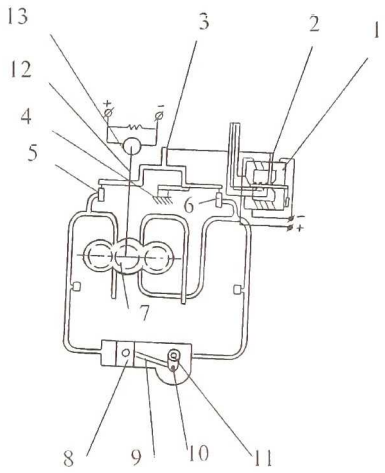


Рис.10.6. Принципиальная электрогидро-схема рулевой машинки:
1 поляризованное реле; 2 коромыс-ло; 3 золотниковый распределитель; 4 - пружина; 5, 6 поршни; 7 шестеренчатый насос; 8 рабочий поршень; 9 шатун; 10 кривошип; 11, 12 - вал; 13 - мотор

нир. При повороте распределителя один из поршеньков перекроет перепускной канал, и масло, подаваемое шестеренчатым насосом (ШН), поступит в полость рабочего цилиндра, передвигая рабочий поршень. Сила через шатун и кривошип будет передана на вал руля. Прикрепленный к валу руль повернется в нужную сторону. ШН приводится во вращение мотором через вал (рис.10.6).

Рабочее тело масло электрогидравлической РМ в процессе работы не расходуется. Поэтому в качестве резервуара используется литой из алюминиевого сплава корпус, в котором расмещаются узел управления и ШН. На насосе крепится кронштейн с поляризованным реле и качалкой. На корпусе имеются штепсельные разъемы (ШР) для подвода тока к реле и к электродвигателю ШН. Электродвигатель вынесен из корпуса РМ и соединяется с ним фланцем.

При работе насоса жидкость, попадая во впадины между зубьями, увлекается шестернями на сторону нагнетания в силовой цилиндр. Обратный поток в сторону всасывания невозможен, так как зазор между зубьями и корпусом ШН весьма мал, а зубья находятся в зацеплении.

Каждый узел РМ (корпус, силовой механизм, ШН, узел управления) собирается и испытывается по отдельности, после чего производится общая сборка и испытания РМ в целом.

К изготовлению РМ предъявляются высокие технические требования, обеспечивающие надежную работу их в условиях эксплуатации и длительного хранения. Эти требования распространяются как на изготовление отдельных деталей (в соответствии с чертежом, без заусенцев, острых кромок), так и на сборку отдельных узлов и всего приводного механизма в целом. Например, при изготовлении дета-лей насоса допуск на неплоскостность 0,02/100 мм, камера высокого давления испытывается при давлении 12 МПа на прочность.

Сборка и испытания отдельных узлов РМ могут вестись параллельно, а затем эти узлы последовательно устанавливаются в корпус (рис.10.7).

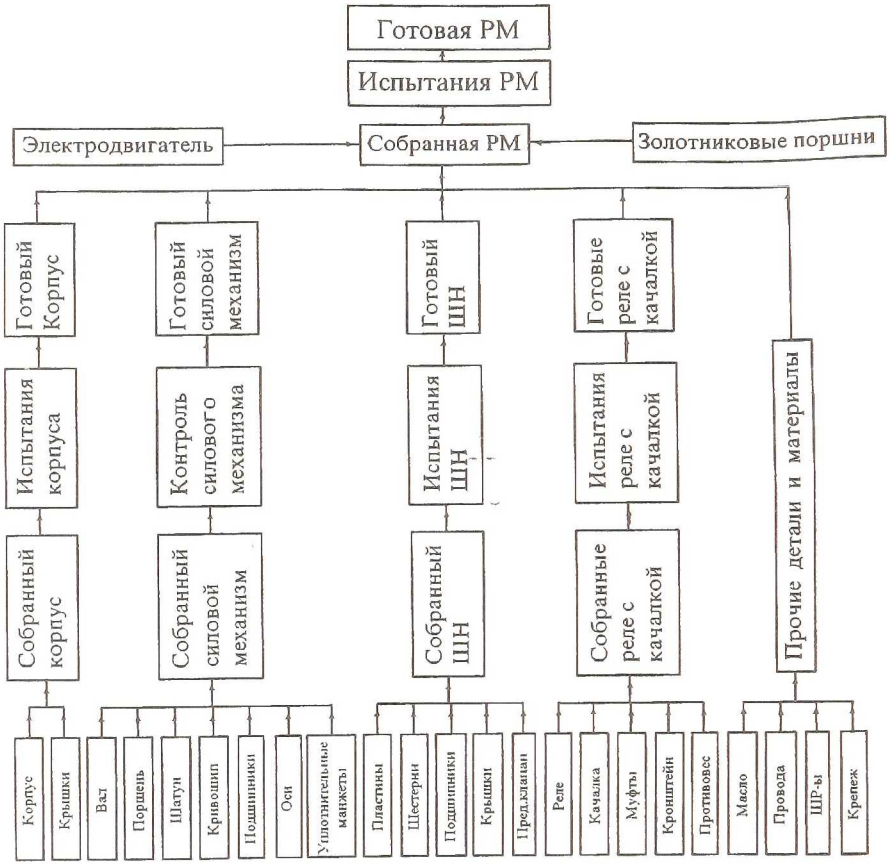


Рис.10.7. Схема сборки и испытания электрогидравлической РМ

Корпус изготавливается механической обработкой из алюминиевого литья. Прежде чем подать корпус на сборку, он подвергается испытаниям на прочность и герметичность. Испытанию на прочность подвергается только полость высокого давления, где размещается кривошипный механизм. Эти гидроиспытания проводятся на специальном стенде методом погружения в жидкость (метод аквариума).

В случаях положительных результатов испытания корпуса в нем монтируется кривошипно-шатунный механизм, правильность сборки и установки которого определяется по перемещению (не должно быть сильного трения и заеданий) и по величине угла поворота вала РМ в двух направлениях, замеряемого с помощью специального приспособления.

Параллельно со сборкой силового механизма ведется сборка ШН, к изготовлению отдельных деталей и сборке которого предъяв-

ляются очень высокие требования. Так как производительность насоса во многом зависит от величины зазора между поверхностью корпуса и наружными поверхностями зубчатых колес, а также боковой поверхностью шестерен и торцами внутренних плиток, то необходимо, чтобы этот зазор был не более 0,03...0,05 мм, перекос осей шестерен 0,01/100, допуск на расположение осей ±0,005 мм. Эта точность достигается специальным методом изготовления. Весь макет корпуса по отверстиям разделывается совместно по специальным мастер-плиткам. Дальнейшая сборка насоса ведется с помощью специального эталонного комплекта шестерен. А необходимый комплект определяется методом подбора шестрен.

После того как насос окончательно собран, его отправляют на обкатку, выполняемую на специальном стенде. Обкатка производится с целью приработки шестерен насоса при различных режимах работы.

После обкатки шестенчатый насос промывается и производится замер его производительности и проверка срабатывания предохранительных клапанов. По окончании указанного объема испытаний годные ШН подаются на ОС РМ.

Узел управления предназначен для обеспечения в определенное время подвода рабочего давления масла с той или другой стороны кривошипно-шатунного механизма, а значит перемещения вала РМ в нужном направлении и на определенную величину. Он включает в себя поляризованное реле с качалкой. После сборки узел управления поступает на динамическую балансировку, заключающуюся в обеспечении баланса качалки (неподвижности ее) при воздействии значительных сил (нагрузок). Динамическое воздействие на узел управления осуществляется с помощью центробежного стенда.

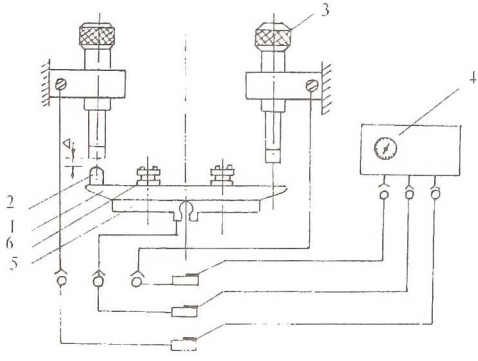


Рис.10.8. Электрическая схема динамической балансировки

На рис.10.8 показана электрическая схема динамической балансировки.

На муфтах *6* качалки *5* закрепляется специальная стрелка с контактами. Напротив контактов закрепляются микрометрические винты *3* с определенным зазором Δ. Микрометрические винты, стрелка и качалка включены в электрическую цепь. В случае перемещения (дисбаланса) качалки контакт стрелки касается микрометрического винта, и цепь замыкается, что фиксируется миллиамперметром *4*.

Порядок динамической балансировки заключается в следующем. Микрометрические винты поочередно подводятся к контактам *2* стрелки *1* и записываются показания, определяющие её статическое положение. Затем один микрометр отводится за пределы контактирования, а второй на расстояние, обеспечивающее контактирование при заданной перегрузке (20g), а потом на минимальное расстояние, обеспечивающее отсутствие контакта. Потом то же повторяется для первого микрометрического винта. Разность между перемещениями контактов микрометров от нулевого положения качалки является дисбалансом. Если дисбаланс больше допустимого, то с помощью балансировочных гаек его уменьшают до минимума. Узел управления промывается и подается на ОС РМ, которая осуществляется по схеме на рис.10.7.

После ОС в РМ заливается масло определенного объема и идеальной чистоты. Затем выполняются регулировка и испытания РМ.

В процессе регулировки добиваются необходимых параметров, например, обеспечения нулевого (исходного) положения выходного вала РМ при отсутствии командного тока (I_k=0), определенной чувствительности, необходимой скорости и угла поворота в двух направлениях при различных величинах командного тока, динамических характеристик и т.п. Для регулировки и испытания РМ применяется специальная установка. На этой установке проводят следующие проверки.

1. Перемещения ненагруженного исполнительного вала силового механизма при включенной обмотке подмагничивания и отсутствии сигналов на обмотках управления поляризованного реле. Перемещение вала допускается, но должна прекращаться при подаче в одну из управляющих обмоток сигнала не более 0,25 мА. Если перемещение вала не прекращается при подаче сигнала 0,25 мА, то следует произвести регулировку длины золотникового поршня, при которой будет отсутствовать его перемещение.
2. Зоны нечувствительности (интервал сигналов, в котором исполнительный вал остается неподвижным), представляет собой сумму абсолютных значений сигналов, если они имеют разные знаки, и разность, если знаки сигналов одинаковы. Под чувствительностью РМ понимается сила минимального командного тока, при которой происходит трогание вала РМ. Для определения зоны нечувствительности подают сигнал в обмотку управления поочередно: 0,1 мА; 0,2 мА; 0,3 мА и т.д., до тех пор, пока вал начнет двигаться. Из имеющихся данных о силе поданного сигнала, при котором произошло начало движения вала, определяют зону нечувствительности, которая должна быть не более 0,5 мА.

Например, движение вала по часовой стрелке начинается при I_k=+0,4 мА, а против при -0,1 мА. Зона нечувствительности |-0,1|÷|+0,4| = 0,5 мА.

3. Смещения нуля равного полусумме сигналов, определяющих зону нечувствительности с учетом их знаков.

   Для указанного примера смещение нуля будет равно

   $$\left[(-0{,}1)+(0{,}4)\right]/2=+0{,}15 \text{ мА}.$$

4. Скоростной характеристики РМ, которая проверяется углом поворота вала РМ в зависимости от характера его нагружения и силы командного тока.
5. Правильности направления вращения вала РМ, для чего подают командный ток разных знаков - (+) или (-). По отклонению стрелки электротахометра вправо или влево судят о направлении вращения вала РМ. Если подается плюсовой ток, то вал вращается по часовой стрелке (если смотреть с торца на вал), а при минусовом токе - против часовой стрелки.
6. Силы тока, потребляемого электродвигателем, по амперметру при холостом ходе и под нагрузкой РМ.

После сборки и регулировки рулевые машинки проходят широкий комплекс различных видов испытаний с целью определения действительной, а вернее, номинальной технической работоспособности и надежности. РМ подвергаются следующим видам испытаний: приработочным, контрольным, типовым, транспортным, ресурсным.

Приработочные испытания предназначены для выявления дефектов (отказов), появившихся в процессе производства. Это первый этап работы собранной, готовой РМ, когда вероятность появления отказа наибольшая. Поэтому приработку РМ проходят на производстве с тем, чтобы в эксплуатации избежать отказов. Приработке подлежат все РМ. Приработка производится под нагрузкой на валу РМ путем подачи попеременно в обмотки управления командного тока. Программа приработочных испытаний включает в себя циклическую работу РМ в определенных режимах. Например, РМ работает 30 циклов по 20 мин, причем 15 мин она работает вхолостую, а 5 минут с подачей команд. Через каждые 5 циклов проверяются параметры работоспособности РМ. Кроме того, специальным синус-датчиком меняется частота и форма команд. Время приработочных испытаний составляет 10% ресурса РМ.

Контрольные испытания предназначены для определения работоспособности при испытаниях РМ на вибрацию и герметичность, а также включают в себя контроль прочности и сопротивления изоляции электрических проводов разобщенных цепей. Контрольные испытания проходят все РМ.

При испытаниях на вибрацию проверяют прочность и устойчивость РМ. Изделия, способные противостоять разрушающему влиянию механических воздействий (вибрации, тряски и ударов) и продолжать после этого нормально выполнять свои функции, относятся к вибро-, тряско- и ударопрочным. Изделия, способные нормально выполнять свои функции во время вибрации, считаются виброустойчивыми. К основным источникам вибрации на ЛА относится двигательная установка.

Испытания чаще всего проводятся на специальных вибростендах. Наиболее часто приборы и агрегаты ЛА подвергаются при испытании вибрации синусоидальной формы, которая характеризуется основными параметрами, связанными формулами:

$$J_g = \frac{(2\pi\nu)^2 S}{g} = \frac{4\pi^2 \nu^2 S}{9810}, \text{ или } J_g \approx \frac{2S}{500}\nu^2, \qquad (10.1)$$

где S амплитуда смещения, мм; J_g - амплитуда ускорения в единицах g; ν частота вибрации в секунду или Гц ($\nu = n/60$); n частота вибрации в мин.

При испытаниях РМ наиболее часто используются механические инерционные вибростенды.

Испытания на герметичность при пониженном давлении проводятся в специальной бронекамере (бронешкафу) при давлении P=0,66 кПа в течение 15 мин. Оценка герметичности осуществляется визуально и с использованием фильтровальной бумаги. При этом запотевание корпуса не допускается.

Типовые испытания предназначены для определения качества и работоспособности РМ в условиях, типичных для эксплуатации. Эти условия определяются тремя основными факторами: механическими нагрузками, связанными с работой конструкции в полете; окружающими условиями (температура, давление, влажность); возможностями транспортировки. Типовым контрольным испытаниям подвергаются 3...5% РМ от серии, но не менее трех. После типовых испытаний РМ на изделие не ставятся.

Программа типовых испытаний включает следующие испытания: на вибронагрузки с повышенной частотой; на воздействие линейных центробежных ускорений; на воздействие высокой температуры; на воздействие низкой температуры; на воздействие повышенной относительной влажности; на воздействие пониженных давлений.

Испытания на нагрузку с повышенной частотой заключаются в том, что РМ устанавливается в специальное приспособление и закрепляется на столе электромагнитного или электродинамического стенда в определенном заданном положении относительно направления действующих сил. Затем производится испытание с частотой 300 Гц и амплитудой 1 мм. Время испытания 5 мин. После этого проверя-

ется надежность крепления болтовых соединений и параметры работоспособности РМ. Испытания на воздействие линейных ускорений проводятся на центрифугах, причем амплитуды ускорения (J_g) в единицах ускорения силы тяжести (g) выражаются зависимостью

$$J_g = \frac{\pi^2 n^2 R}{900g}, \qquad (10.2)$$

где n частота вращения стола, мин$^{-1}$; R радиус вращения расстояние от оси до закрепления изделия. Откуда

$$n = \frac{30}{\pi}\sqrt{\frac{J_g}{R}} \qquad (10.3)$$

Испытания на воздействие окружающих климатических условий проводятся в термобарокамерах и включают в себя:

- испытание при повышенной температуре (t=+50°С в течение 4ч) с последующей проверкой работоспособности;
- испытание при пониженной температуре (t=-50°С в течение 4ч) с последующей проверкой работоспособности после 30 мин. прогрева на холостом ходу;
- испытание при пониженном давлении (P=0,27 кПа в течение часа) с последующим контролем герметичности и проверкой параметров.

Испытания сыростойкости РМ выполняются в камерах тепла и влаги в пределах относительной влажности от 65% до 95% при t=+20°С...+60°С. РМ помещается в камеру с относительной влажностью до 95...100%, где выдерживается не менее 48 ч.

Для испытания РМ на воздействие ускорений, возникающих при транспортировке в кузовах грузовых автомашин, движущихся по грунтовым, булыжным или асфальтовым дорогам с различной скоростью, служат установки, имитирующие подобие ускорения (до 50 g).

После проведения типовых и транспортных испытаний РМ разбирается, тщательно осматривается с целью выявления возможных дефектов (трещин, износа, разрушения), анализируются их причины и даются рекомендации по усовершенствованию конструкции.

Ресурсные испытания проводятся по назначению главного конструктора и заказчика на отдельных экземплярах РМ по определенной программе. Время испытаний определяется заданным ресурсом. После испытаний РМ полностью разбираются и анализируются возможные изменения конструкции.

11. КОМПЛЕКСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА ЛЕТНО-ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ, КОНТРОЛЬНО-ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

11.1.Летные испытания самолета

Летные испытания самолетов проводятся в аэродромном цехе, основным звеном которого является летно-испытательная станция (ЛИС). В зависимости от вида испытаний и их ориентации трудоемкость работ, выполняемых в этом цехе, может составлять от 5 до 10% от общей трудоемкости изготовления самолета. Для сокращения сроков изготовления самолетов стремятся к уменьшению объема работ в аэродромном цехе за счет выполнения ряда работ в сборочных цехах [17, 70]. В аэродромном цехе проводится приемка самолета от цеха общей сборки, наземная отработка самолета перед летными испытаниями и проведение летных испытаний. После летных испытаний проводится устранение неполадок и окончательная отработка самолета. Аэродромный цех производит также сдачу самолета заказчику.

ЛИС обычно включает одно или несколько зданий и летное поле, имеющие одну или несколько взлетно-посадочных полос. В зданиях расположены участки общей отработки самолетов и подготовки их к полету, командно-диспетчерский пункт, оборудованный радиоаппаратурой для управления всей летной работой, лаборатории, гараж, мастерские, склады и другие хозяйственные помещения. Участки общей отработки самолетов могут располагаться и на открытых площадках, оборудованных комплектом стремянок, постоянными точками питания электроэнергией и сжатым воздухом.

В состав ЛИС, кроме оборудования рабочих мест для работ на самолете, входят также склады горючих и смазочных материалов, зарядные станции для аккумуляторов, передвижные стенды и генераторы для проверки электросистем, радиооборудования, гидропневмосистем, подогревательные устройства, силовые установки и многое другое. Гараж включает машины общего назначения, электрокары, буксирующие приспособления, снегоуборочные, санитарные и пожарные машины. Мастерские оснащены станочным парком, сварочными постами, участками для слесарных работ.

Самолеты заправляются топливом и маслом как от топливо- и маслозаправщиков, так и от специальных стендов. Имеются устройства для слива масла и топлива, а также системы заправки кислородом и азотом. Запуск двигателей и проверку работы электро- и

радиооборудования производят от источников электрического тока электрокаров и специальных установок. Для отработки радиооборудования и гидросистем применяются специальные стенды. Для подъема самолета в линию полета и отработки подъема и выпуска шасси применяются специальные гидравлические подъемники.

После приемки самолета от цеха общей сборки на ЛИС проводится проверка электрооборудования, гидро- и пневмосистем, топливной системы, маслосистемы, системы заправки баков и тарировка. Производится проверка шасси (уборка, выпуск, сигнализация), органов управления самолетом и управления силовой установкой. Проверяется работа двигателей в наземных условиях, а также работа систем спецоборудования, аэронавигации, радиолокации и внешней и внутренней связи.

Проверка каждой системы начинается с осмотра и проверки монтажа в цехе общей сборки, затем производится стендовая проверка систем. При стендовой проверке подключается питание, устанавливаются рабочие режимы работы и системы проверяются в работе. На ЛИС проводится проверка систем при работающем двигателе, когда питание системы проводится от агрегатов, приводимых в движение двигателями. Такие проверки присущи только аэродромному цеху.

Проверка систем производится по инструкциям, в которых указана последовательность работ, способы регулирования и выходные параметры системы.

При проверке органов управления проверяются углы отклонения рулей, элеронов, триммеров, силы на ручку и педали, давление в гидросистеме бустерного управления, отсутствие зазоров в тягах, качалках, силы натяжения тросов. Особое внимание обращается на зазоры между движущимися частями тяг. Натяжение тросов проверяется тензометром, для проверки углов отклонения органов управления применяется специальный угломер.

При проверке выпуска и уборки шасси замеряют время, проверяют закрытие замков, срабатывание сигнализации убранного и выпущенного положения и аварийной сигнализации, вписываемость створок и обтекателей шасси в убранном положении.

Проверка топливной системы начинается с испытаний на герметичность и проверки показаний топливомеров. Тарировку топливомеров производят путем заливки в баки замеренного количества топлива и регулирования показаний самолетных топливомеров. При проверке топливной системы на самолете запрещаются работы, связанные с появлением электротока в проводах и искр от ударов. Электропитание топливомеров включается только после заправки и проверки на герметичность. Для лучшего выявления мест течи топливо иногда подкрашивают. Все работы, связанные с заливом и перекачкой топлива при

испытаниях, проводят с помощью специальных стендов. Применение стендов значительно сокращает цикл работ по любым видам заливки и слива топлива, когда требуются точные замеры объема, позволяет высвободить рабочих и обеспечить чистоту мест заправки.

При проверке работы двигателей проверяют пусковую систему, температурный режим, давление топлива на различных режимах, работу агрегатов, установленных на двигателе. При проверке масляной системы двигателя особое внимание уделяется чистоте, герметичности, проверяют её функционирование.

Подготовка самолета к полету начинается после отработки всех систем самолета. Самолет укомплектовывается эксплуатационными аккумуляторами, заправляются все его системы. Завершает подготовку предполетный осмотр, который проводит отдел технического контроля, экипаж и представители заказчика.

Летные испытания проводятся по специальной программе, в которой указаны параметры проверяемых систем, методики проверок, режимы работы и т.д. Определяется, что и как должно быть проверено каждым членом экипажа при запуске двигателя, рулежке, взлете, наборе высоты, полете и посадке. Проверяется работа двигателей на земле и в полете на всех режимах, работа органов управления, определяется скороподъемность и скорость самолета на разных высотах, уборка и выпуск шасси, работа высотной и противообледенительной системы, проверяется прочность самолета путем создания перегрузок. Ряд показателей регистрируется контрольно-записывающей аппаратурой.

Все дефекты, обнаруженные в процессе полета, вписываются в полетный лист, в случае необходимости после устранения дефектов проводится повторный полет.

После облета экипажем ЛИС самолет вновь проходит наземную отработку. Самолет осматривается так же, как и перед полетом, проверяется по специальной инструкции состояние различных систем после полета, устраняются все недостатки, выявленные в полете и после осмотра. Особое внимание уделяется выявлению возможных нарушений целостности деталей и их соединений от нагрузок в полете. Для проверки некоторых наиболее ответственных креплений и узлов их выборочно разбирают. В масляной, гидравлической и топливной системах проверяют, нет ли в фильтрах металлической стружки, свидетельствующей о заедании и быстром износе трущихся поверхностей агрегатов. При обнаружении стружки определяют агрегат с дефектами, устанавливают принцип дефекта и заменяют его.

Устранив все дефекты, выявленные при летных испытаниях и послеполетном испытании, самолет готовят к приемо-сдаточному полету экипажа заказчика. Перед полетом представители заказчика проверяют документацию, производят полный предполетный осмотр самолета с

опробыванием на земле работы всех систем и двигателей. Наземное обслуживание полета экипажа заказчика производится службами ЛИС. Техническая готовность самолета к эксплуатации оформляется двусторонним подписанием приемо-сдаточной документации.

11.2. Работы, проводимые с космическим аппаратом и ракетой-носителем на контрольно-испытательной станции и технологическом комплексе

Контрольно-испытательная станция (КИС) обычно состоит из зала испытаний, где размещаются испытуемые КА и РН, пультовых помещений и помещений для инженерно-технического персонала. Для защиты персонала от электромагнитного излучения зал обшивается стальным листом с герметической проваркой стыков, для поглощения электромагнитного излучения в диапазоне радиочастот стены и потолок покрываются радиопоглощающим материалом. Для защиты от статического электричества пол покрывается составами, обеспечивающими стекание зарядов. Контрольно-проверочная аппаратура размещается в пультовых помещениях. Для подключения КА к контрольно-проверочной аппаратуре предусматривается устройство кабельных каналов, которые находятся в подвальном помещении. В состав КИС обязательно входит вычислительный комплекс.

Основной задачей КИС является качественное проведение электрических испытаний в соответствии с конструкторской документацией [77]. Перед проведением электрических испытаний монтируются и подключаются кабели, проверяется контрольно-испытательное оборудование и делается письменное заключение о пригодности данного комплекса для испытания конкретного КА. Электрические испытания КА выполняются по программам и методикам, являющимся конструкторскими документами, с неукоснительным соблюдением требований инструкций по эксплуатации систем.

При возникновении отказа в работе аппаратуры путем анализа электрических схем устанавливают, с какой системой связан отказ. Разрабатывается программа поиска, которая включает в себя определение необходимых воздействий на неисправную систему с целью перевода системы в режим, при котором выявлен отказ и определение необходимых измерительных средств для проведения поиска. После определения неисправного блока делается заключение о замене его на кондиционный. После замены блока проводится частная программа испытания замененного блока.

Проведение электрических испытаний начинается с входного контроля, которому подвергаются все приборы и системы, поступившие на завод-изготовитель от смежных предприятий. Входной контроль проводится в следующей последовательности: внешний осмотр, проверка

сопроводительной документации, проверка соответствия характеристик приборов техническим условиям.

До передачи КА на КИС проводится автономное испытание систем, если приборы и агрегаты системы изготавливались на разных заводах и автономные испытания приборов или агрегатов в процессе сборки, если они включены в инструкцию на установку данного прибора или агрегата.

После передачи КА испытания проводятся в следующей последовательности: автономные испытания систем; стыковочные испытания систем; общие комплексные испытания механически расстыкованного КА; общие комплексные испытания механически собранного КА.

На первом этапе питание систем осуществляется от источников питания, входящих в состав контрольно-проверочной аппаратуры, связи между системами отсутствуют, имитацию сигналов от смежных систем выполняет контрольно-проверочная аппаратура проверяемой системы. В процессе испытаний производится проверка сопротивления изоляции питающих цепей и тока, потребляемого системой, параметров сигналов, выдаваемых на смежные системы, и реакция системы на сигнал и команды от смежных систем. В каждой системе проверяются все резервные варианты.

Стыковочные испытания систем проводятся с целью снижения трудоемкости следующего этапа испытаний. При этих испытаниях напряжение, подаваемое на системы, поступает от бортовой системы электроснабжения. В испытаниях участвует бортовая система телеконтроля. В этих испытаниях могут участвовать не все бортовые системы, а лишь часть из них.

Далее проводятся общие комплексные испытания механически расстыкованного КА. Для удобства испытания КА расчленен на части и состыкован кабелями-удлинителями, крышки приборных отсеков сняты, подвижные элементы конструкции обезвешены, часть элементов конструкции расстыкована, приведена в полетное положение и также обезвешена. При проведении испытаний проводится проверка взаимодействия всех систем, стабильности их характеристик в процессе испытаний, резервирования важнейших систем и работоспособности систем на основных режимах. Проводится также замер пусковых токов систем, уровня пульсации подключения питания и проверка работы автоматики при имитации аварийных ситуаций.

Для проведения комплексных испытаний проводятся все механосборочные работы, на КА устанавливается ЭВТИ с обеспечением доступа к технологическим разъемам, подвижные конструкции обезвешиваются. При проведении испытаний проводится проверка функционирования всех подвижных частей при установленной ЭВТИ, испытания КА по программе электромагнитной совместимости систем, испытания при работе приемопередающих устройств, подтверждение

совместимости радиолиний при работе на штатный тракт антенно-фидерной системы.

Бортовой системой телеизмерений выполняется поочередный опрос электрических сигналов с датчиков систем, на КИС проводится также регистрация, расшифровка и оценка телеметрической информации, которая заключается в сравнении графиков поведения параметров на термограммах, получаемых с наземных регистрирующих станций, с графиками, приведенными в инструкции. По результатам проведения электрических испытаний и оценки телеметрической информации дается заключение о работоспособности систем и КА в целом.

Предполетные испытания и подготовка к запуску КА производятся на технологическом комплексе.

Предполетными испытаниями называется совокупность технологических операций, проводимых на космодроме и предназначенных для проверки работоспособности систем, агрегатов и механизмов КА перед его запуском. Испытания включают в себя электрические, механические и пневмовакуумные испытания.

Подготовкой к запуску называется совокупность технологических операций, обеспечивающих запуск и нормальное функционирование КА в натурных условиях. Подготовка включает в себя монтажно-сборочные и стыковочные работы, установку ЭВТИ, заправку КА компонентами топлива и сжатыми газами, заряд бортовых батарей и т.д.

Транспортировка КА осуществляется в специальном контейнере, оборудованном узлами, креплениями, устройствами амортизации и дыхательными лючками. С помощью траверс и мостового крана аппарат выгружается из контейнера. Если аппарат транспортируется в вертикальном положении, то он сразу устанавливается на рабочее место в универсальный стенд испытаний и обслуживания, где тщательно закрепляется.

После установки на рабочее место КА должен быть незамедлительно заземлен, в процессе дальнейших работ с ним должны неукоснительно соблюдаться меры защиты приборов и оборудования от статического электричества. После осмотра производится расконсервация систем, приведение их в исходное состояние для проведения испытаний. Проверяется герметичность приборных отсеков, расходных баков и других емкостей, проводится сборка схемы электричеких испытаний и подготовка к ним.

Электрические испытания на техническом комплексе должны быть по возможности идентичны электроиспытаниям на КИС завода-изготовителя, что позволяет проводить их по аналогичной отработанной эксплуатационно-технической документации и судить о стабильности результатов испытаний. Они также разделяются на автономные, в которых проводят детальные испытания отдельно взятой системы, стыковочные - совместные испытания

двух и более систем и комплексные – это испытания всех систем, объединенных в единую бортовую схему. После проведения электрических испытаний, обработки и оценки телеметрической информации КА передается на пневмовакуумные испытания.

Пневмовакуумные испытания проводятся в вакуумной камере методом динамического поиска течи. Эти испытания проводятся с особой тщательностью, при обнаружении негерметичности её устраняют и повторяют испытания. После завершения пневмовакуумных испытаний КА его гермоотсеки заправляются воздухом и газами нужной чистоты до определенного давления и требуемой точки росы. После заправки отсеков воздухом и газами КА устанавливают на юстировочный стенд и проводят контроль юстировки оптических приборов, двигателя, антенн. Затем КА снова подвергают комплексным испытаниям в полном или частичном объеме с целью проверки работоспособности систем после пневмовакуумных испытаний.

На КА устанавливается ЭВТИ и проводятся заключительные электрические операции перед заправкой. Заправка сжатыми газами и компонентами топлива производится на заправочно-нейтрализационной станции. Многие виды работ на заправленном космическом аппарате запрещены, поэтому к моменту заправки все системы должны быть проверены и готовы к запуску.

После заправки КА транспортируется в монтажно-испытательный корпус космических объектов для сборки космической головной части. Собранную космическую головную часть подают на стыковку с ракетой-носителем, которая производится в монтажно-испытательном корпусе РН.

В свою очередь окончательно изготовленная РН, прошедшая заводские приемо-сдаточные испытания и апробированная (защищенная) летными телеметрическими испытаниями представителя от партии этих изделий, поступает на стартовую площадку.

Ступени и КА в несостыкованном состоянии устанавливают в бандажах на монтажно-стыковочные тележки. Удаляют технологические заглушки с электрических колодок ступеней и КА. К штепсельным разъемам подсоединяют технологические кабели, которые соединены с пультом управления испытаниями. После этого производится стыковка ступеней и КА.

В ЭВМ пульта управления вводят программу полета ракеты и выхода на орбиту КА. Программа полета РН, имитируя процессы, происходящие на борту ракеты во время полета, и тестовые внешние возмущения, ведет диалог с электрической системой РН во времени и проверяет работу автоматики, органов управления и целостность электрических цепей.

На органы управления первой ступени с пульта подается команда предварительного наддува. Проверяется срабатывание электропневмоклапанов системы предварительного наддува во времени и целостность основных и дублирующих электрических цепей.

При условном пуске РН срабатывают системы включения двигательной установки и основного наддува. Проверяется время условного выхода двигательной установки в режим и отрыва от пускового наддува. В конце работы первой ступени подается команда выключения системы основного наддува. По истечении определенного времени выключается двигательная установка первой ступени, срабатывают цепи подрыва разрывных болтов, соединяющих ступени, включается система отвода первой ступени. Включается двигательная установка и система наддува второй ступени.

Аналогично проверяется работоспособность электрических цепей и органов управления второй ступени и вывода КА на орбиту.

Пульт управления испытаниями выдает характеристики работоспособности электрических цепей ракеты во времени, нарушения времени прохождения команд и срабатывания автоматики на борту РН, если таковые имеются.

При обнаружении нарушения производится дефектация этих узлов и электрических цепей, устранение нарушений и повторные испытания в полном объеме.

При отсутствии нарушений от борта РН отстыковываются технологические кабели. Штепсельные разъемы на РН закрываются технологическими заглушками. Заглушки пломбируются. Оформляется сопроводительная документация, подтверждающая работоспособность РН. РН подается на погрузку.

Все перечисленные испытания проводятся перед пуском РН на полигоне.

После установки на стартовый стол РН проходит предварительную проверку и контроль по специальной программе, после чего она считается готовой к старту.

Приведенные испытания обеспечивают производство изделий и их эксплуатацию с достаточной степенью надежности.

12. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

12.1. Надежность как прикладная научная дисциплина и её задачи по обеспечению качества летательных аппаратов

Основной характеристикой любого технического изделия (самолета, КА, РН и т.д.) является его эффективность. Под **эффективностью** понимают свойство изделия соответствовать своему назначению. Эффективность определяется качеством изделия и условиями его эксплуатации. При этом качество изделия определяется не всеми его свойствами, а только той совокупностью его свойств, которые обуславливают пригодность изделия для удовлетворения определенных потребностей в соответствии с его назначением. В зависимости от вида изделия и его назначения совокупность его свойств, определяющих качество изделия, может существенно изменяться. Однако абсолютно для всех изделий в эту совокупность свойств входит такое свойство изделия, как надежность.

Надежностью называется свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки (ГОСТ 27.002-83).

В свою очередь надежность является комплексным свойством изделия, состоящим из следующей совокупности свойств: безотказность, долговечность, сохраняемость и ремонтопригодность. В зависимости от вида изделия каждая из этих отдельных составляющих надежности имеет различную относительную значимость для конкретного изделия. Так, если для ракеты её ремонтопригодность практически малозначима, то для самолета или технологического оборудования значимость этого свойства очень велика.

Хотя надежность является только одним из свойств качества, тем не менее именно надежность изделия в абсолютном большинстве случаев определяет его эффективность (в том числе экономическую и тактико-техническую) и безопасность его использования. Так, из-за недостаточной надежности изделий стоимость затрат на их ремонты и техническое обслуживание может в несколько раз превышать стоимость нового изделия (в СССР этот показатель по самолетам достигал 5, а по станкам -8 раз). Например, в 1984 г. в СССР на ремонт всех видов технических изделий было израсходовано 35 млрд. руб и 20% произведенного металла. В ремонтных цехах было занято 25% станочного парка и 6 млн. работников.

Существенное недоиспользование потенциальных возможностей изделий имеет место при завышении требований к их безотказности, так как в этом случае изделия снимаются с эксплуатации при меньших сроках службы. Существуют и такие последствия ненадежности изделий, которые нельзя оценить никакими экономическими и техническими показателями – гибель людей и экологические катастрофы. Так, несмотря на то, что в самолетостроении закладываются показатели безопасности 1,5 и выше, тем не менее по данным ИКАО на регулярных пассажирских линиях на 100000 ч налета приходится в среднем до 2,5 катастроф. В военной авиации коэффициент аварийности существенно выше, чем в гражданской. Проблема надежности изделий в настоящее время всеми общепризнана, и на обеспечение надежности новых изделий вкладываются суммы, достигающие 80...90% всех затрат по техническому проекту.

Вероятностная природа показателей надежности.

При испытаниях любой партии деталей, изготовленных из одной плавки по одной технологии, всегда наблюдается разброс значений в измеренных характеристиках. Так, коэффициент вариации предела прочности специальных образцов из сталей достигает 0,07, коэффициент вариации предела выносливости образцов достигает 0,15, а коэффициент вариации интенсивности изнашивания может достигать 0,2. Значения же коэффициентов вариации этих же величин для деталей изделия может быть существенно больше. Поэтому проводя расчет специального образца или детали изделия на предельные характеристики по какому-нибудь параметру возникает вопрос: какое значение предела прочности (предела усталости, интенсивности изнашивания и т.д.) необходимо подставить в расчет? Если мы подставляем наименьшее возможное, то это заведомо приводит к снижению эффективности изделия. Подстановка максимального значения будет приводить к слишком частому возникновению поломок. Реальное же значение рассматриваемой характеристики для выбранной детали неизвестно. Его можно получить только после её испытания, но при этом деталь уже будет непригодна для эксплуатации в составе изделия. Правильный ответ на такой вопрос может быть сформулирован только в вероятностном аспекте – подставляя выбранное значение параметра в расчет, необходимо указать или рассчитать вероятность возникновения отказа для этого значения параметра.

Аналогичная ситуация возникает при испытании самих изделий – отказы одинаково изготовленных изделий и испытываемых в одинаковых условиях также возникают через различные промежутки времени. Возникает вопрос: какой ресурс назначить для этого изделия? Ответ на этот вопрос совпадает с ответом в предыдущем случае. Таким образом, анализ надежности изделия должен проводиться с учетом вероятностной природы обеспечения требуемого уровня

характеристик материалов, изготовленных из них деталей и изделия в целом. Необходимо иметь ввиду, что реально эксплуатируемое изделие (ракета, самолет, станок и т.д.) находится под воздействием внешних нагрузок, значения которых также имеют разброс. Не менее важное влияние на параметры надежности и их дисперсию оказывают внутренние физико-химические процессы при работе самого изделия.

Задачи и основные разделы прикладной научной дисциплины о надежности изделия.

Важнейшая роль надежности в обеспечении эффективности изделий, а также её методологические особенности привели к выделению надежности в самостоятельную прикладную научную дисциплину. Наука о надежности изучает закономерности изменения показателей качества изделий и на основании этого разрабатывает методы анализа и обеспечения показателей надежности при проектировании, изготовлении, испытании и эксплуатации изделий [57]. В связи со спецификой различных видов технических изделий в науке о надежности есть самостоятельные направления, определяемые видом изделия. В этих направлениях много общего, но есть и отличия, связанные в основном с технологическими и конструктивными методами обеспечения надежности конкретных видов изделий.

Перед наукой о надежности стоят задачи: установление источников информации об изменении показателей надежности; разработка методов диагностики изменения показателей качества; исследование физико-химических закономерностей, приводящих к изменению показателей качества; разработка математических методов расчета, прогнозирования и подтверждения значений показателей качества по результатам испытаний; разработка технических рекоендаций, конструктивных, технологических и организационных методов, обеспечивающих достижение заданной надежности изделий.

Прикладная научная дисциплина о надежности изделий базируется на двух разделах математической теории надежности и физике отказов. Математическая теория надежности разрабатывает математические модели надежности технических систем и методами теории вероятности и математической статистики прогнозирует поведение таких систем. Физика отказов разрабатывает физические и математические модели изменения свойств материалов в результате внешних воздействий. Результаты этих двух разделов служат исходными данными для проектирования и расчета изделий на надежность, а также для разработки технологий производства изделий с нужным уровнем надежности и качества.

Основные виды работ и этапы формирования надежности летательных аппаратов.

Действующими стандартами регламентирован единый порядок разработки, производства и эксплуатации создаваемых

изделий, который состоит из трех основных стадий: разработка изделия; серийное производство; эксплуатация изделия.

Особенность решения вопросов по надежности при создании изделий заключается в том, что эти вопросы должны решаться на каждой из перечисленных стадий, так как изменить уровень надежности изготовленного изделия нельзя, как, например, изменить его товарный вид. Только после эксплуатации или специальных испытаний можно определить уровень его надежности, и, если это необходимо, внести коррективы в конструкторскую, производственную или эксплуатационную документацию и изготовить новое изделие с более высоким уровнем надежности. В общем случае только в результате определенного цикла итерации можно гарантировать определенный уровень надежности изготавливаемого изделия. Естественно, такой итерационный путь длителен и требует много материальных ресурсов. В связи с этим при создании новых изделий закладываются специальные мероприятия для ускорения и удешевления процесса отработки изделия на надежность, которые оформляются в виде комплексных программ.

Необходимость решения вопросов по надежности на каждой из трех стадий часто подчеркивается в так называемой формуле надежности изделия надежность закладывается на этапе проектирования (разработки), обеспечивается на этапе производства и реализуется на этапе эксплуатации изделия.

Рассмотрим кратко основные особенности этих трех этапов с точки зрения надежности. После получения задания на разработку изделия производится сбор и изучение данных по диапазонам нагрузки и внешних воздействий на разных стадиях эксплуатации изделий. Изучают фактически достигнутый уровень надежности в эксплуатации изделия и его узлов, выбранных прототипами. На основании этой информации уточняюттребования к отдельным элементам изделия и производят подбор материалов с учетом их прочностных характеристик, обрабатываемости, производственных возможностей и стоимости. После этого разрабатывается комплексная программа достижения нужного уровня надежности изделия с конкретизацией выполняемых работ по отдельным узлам и изделию в целом на каждой стадии создания изделия.

При проектировании и конструировании закладывается надежность изделия. Она зависит от конструкции изделия и её узлов, применяемых материалов и технологий, методов защиты от внешних воздействий, систем смазки, приспособленности к ремонту и обслуживанию и т.д. Любой узел и агрегат можно сконструировать бесконечным числом способов, рассчитав надежность конструкции по статическим нагрузкам. Однако, в настоящее время существует немного расчетов, позволяющих прогнозировать поведение конструкции в ре-

альных условиях эксплуатации с учетом динамики и статистического характера внешних воздействий. Поэтому проектирование строится на основании использования конструкций, которые были в изделиях, прошедших эксплуатацию. Обычно при создании новых типов изделий используется до 50 и более процентов агрегатов и узлов, выполненных по ранее разработанным схемам и апробированных в серийной эксплуатации. Это, с одной стороны, ускоряет и удешевляет процесс запуска в серию изделия, но, с другой стороны, замедляет прогресс развития техники. Для вновь же проектируемых узлов и агрегатов проводится комплекс опережающих мероприятий по их изготовлению и испытанию на моделирующих установках, стендах и специальных летающих лабораториях. Опережающие мероприятия планируются таким образом, чтобы на сборку опытного образца поступали узлы и агрегаты с известными показателями надежности. При производстве изделия должна быть обеспечена надежность, заложенная при его проектировании, т.е. технология изготовления определяет, насколько могут быть реализованы потенциальные возможности конструкции. Известно, что до 80% отказов в работе изделий возникает по вине заводов-изготовителей. На данном этапе надежность зависит от технологий изготовления и сборки деталей, методов контроля, возможностей управления технологическими процессами, соответствия оборудования и технологической дисциплины серийного завода опытно-экспериментальному заводу, а также других технологических показателей, таких как технологическая наследственность, взаимозаменяемость, стабильность параметров оборудования на серийном заводе и т.д. Пока летательные аппараты подвергались эксплуатационным нагрузкам небольшого уровня, делались из среднепрочных материалов, имели большие коэффициенты безопасности и небольшие ресурсы, статические расчеты и существующие технологии обеспечивали надежность изделий. Однако, переход на высокопрочные материалы для обеспечения более высокой эффективности изделия показал, что такие материалы значительно более чувствительны к внешним воздействиям как при эксплуатации, так и при изготовлении.

В этих условиях выяснилось, что технологические процессы очень сильно влияют на надежность. В очень небольшой степени это учитывается в чертежах по шероховатости и покрытиям, а также ссылками на соответствующие технологические инструкции по изготовлению. Однако это совершенно недостаточно, так как два изделия, изготовленные на разных заводах по одинаковым чертежам, будут иметь совершенно разные показатели надежности. В связи с этим во всех высокоразвитых странах мира достаточно давно пришли к пониманию того, что практически все основные элементы "know how" новых изделий связаны с технологией их изготовления. Как

отмечается в [20] ссылки в чертежах на технологические инструкции "отражают в основном печальный опыт конструкторов и конструкторских подразделений", но в малой степени обеспечивают такую регламентацию технологии, при которой гарантирован определенный уровень надежности изделия. Обеспечение гарантированного уровня надежности изделия, особенно в условиях серийного производства, является сложной технической задачей, решаемой в течение достаточно длительного периода запуска изделия в производство с помощью специальных программ или политики обеспечения качества и сертификации.

Важнейшей особенностью и отличием показателей надежности от других показателей качества является то, что их уровень выявляется только при эксплуатации, причем их значения нельзя измерить с помощью прибора на готовом изделии и указать, сколько времени осталось до наступления отказа. Надо отметить, что по некоторым частным направлениям диагностики (спектры акустической эмиссии, наличие частиц износа в смазочных материалах и т.д.) намечается прогресс в оперативной диагностике изделий по текущему состоянию. Приведенная общая схема отработки изделия на надежность конкретизируется в зависимости от вида летательного аппарата и опыта, накопленного в подразделении, обеспечивающем его выпуск.

В связи с тем, что назначение самолета отличается, например, от назначения транспортного аппарата космической системы, для него устанавливаются технический, межремонтный и гарантированный ресурсы [63], поэтому отличаются и их схемы обеспечения надежности. Например, к числу работ, необходимых для определения технического ресурса самолета, относят: комплекс лабораторных испытаний, проводимых в процессе проектирования и создания опытного образца самолета; летные испытания и исследования; комплекс лабораторных испытаний на серийных заводах и заводах-поставщиках; обобщение опыта эксплуатации аналогичных или сходных изделий; анализ материалов ремонтных предприятий; испытания на эксплуатационную надежность; летные эксплуатационные испытания; лидерные испытания. Вместе с тем, общая схема отработки изделия на надежность всегда обязательно включает следующие этапы: задание уровня показателей надежности; анализ проекта на надежность; обеспечение заложенного уровня надежности в процессе изготовления; испытания на надежность; контроль и подтверждение уровня надежности.

12.2. Основные определения и понятия теории надежности

ЛА, как и любое техническое изделие, характеризуется определенным набором свойств. Для количественной оценки определенного свойства вводится понятие показатель. Например,

показатели качества, показатели надежности, показатели точности функционирования, показатели экономичности и т.д. Показатель характеризует в количественном виде, в какой степени эти свойства присущи конкретному изделию.

Показатели могут быть единичными или комплексными.

Для оценки качества изделия обычно используют только те из них, которые определяют его способность эффективно выполнять заданные функции. Эти показатели оговариваются в нормативных документах на изделие. При этом также оговаривается допустимое отклонение этих параметров от установленных значений, уровень внешних нагрузок при измерении параметра и необходимость проведения измерений при обязательном соблюдении методов и сроков технического обслуживания и ремонта изделия.

Свойство изделия сохранять во времени в установленных пределах значения параметров, оговоренных в нормативно-технической документации, характеризует техническое состояние изделия.

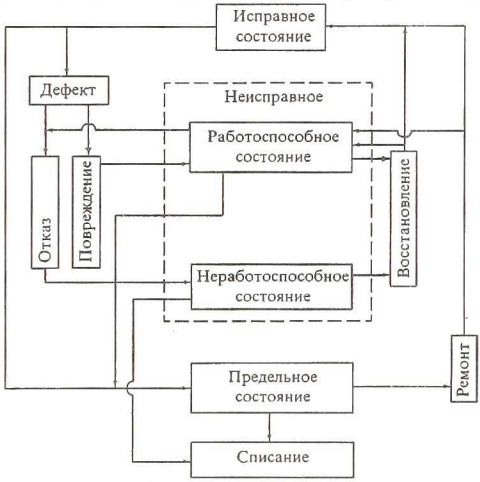


Рис.12.1. Виды состояний изделий

Различают следующие пять основных видов технического состояния изделий: исправное, работоспособное, неисправное, неработоспособное, предельное (рис.12.1).

В исправном состоянии изделие соответствует всем требованиям нормативно-технической и конструкторской документации. Если же изделие не соответствует хотя бы одному требованию этой документации, то его состояние неисправное. В неисправное состояние изделие переходит вследствие возникновения дефекта. Однако, в неисправном состоянии изделие может быть работоспособным и неработоспособным. Работоспособное состояние накладывает меньше ограничений на изделие, чем исправное состояние, и требует, чтобы только те значения параметров, которые характеризуют способность изделия выполнять заданные функции, соответствовали документации на изделие. При этом в документации должно оговариваться, какие параметры обеспечивают работоспособное состояние.

Дефект, приводящий к переходу изделия из исправного состояния в неисправное, но работоспособное, получил название повреждения. В неработоспособном состоянии хотя бы один параметр

изделия, характеризующий его способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям документации. Дефект, приводящий к переходу изделия из исправного или работоспособного неисправного состояния в неработоспособное, получил название отказа. Повреждение изделия сохраняет его способность выполнять заданные функции, а отказ - нет.

Предельное состояние это такое состояние, при котором его эксплуатация должна быть прекращена в соответствии с требованиями документации. Обычно переход в предельное состояние изделия задается после выработки им ресурса или срока службы. Т.е. переход в предельное состояние определяется нецелесообразностью или недопустимостью дальнейшего применения изделия по его назначению. Для изделия в предельном состоянии ставится вопрос либо о целесообразности проведения его ремонта, для перевода изделия в исправное или работоспособное состояние, либо о его списании.

Таким образом, переход изделия из неработоспособного (непредельного) состояния в работоспособное осуществляется с помощью операций восстановления или ремонта (ГОСТ 27.002-83). К операциям восстановления в основном относят операции идентификации отказа (определение его места и характера), замены, регулирования и контроля технического состояния и контроля работоспособности изделия в целом. При ремонте же происходит восстановление ресурса изделия в целом. В основном термин ремонт применяется при восстановлении работоспособности изделия из предельного состояния.

В зависимости от вида изделия подразделяют на восстанавливаемые и невосстанавливаемые. Восстанавливаемые изделия это те, для которых в рассматриваемой ситуации (вид дефекта) восстановление работоспособности предусмотрено нормативно-технической и конструкторской документацией. Таким образом, восстанавливаемое изделие может при определенных видах дефектов не подлежать восстановлению.

В зависимости от того, предусмотрено ли документацией проведение ремонта на изделие в предельном состоянии, все изделия подразделяют на ремонтируемые или неремонтируемые.

В настоящее время значительная часть авиационных изделий эксплуатируется по фактическому состоянию. При этом в процессе планового технического обслуживания производится дефектация и восстановление исправного состояния без отправки изделия в специализированные ремонтные предприятия. Для применения этого прогрессивного метода необходимо оснащать изделия эффективными средствами контроля и диагностики работоспособности основных частей, отказы которых влияют на безопасность полетов, а также обеспечивать контролепригодность, доступность, взаимозаменяемость и идентичность функциональных характеристик отдельных узлов и агрегатов.

Виды отказов технических изделий.

В нормативно-технической документации на изделие указываются признаки, позволяющие установить факт нарушения его работоспособности. Эти признаки по своей сути являются критериями отказа технического изделия.

Отказы технических изделий могут быть детерминированными или случайными. Детерминированные отказы возникают из-за грубых ошибок на этапе разработки, изготовления или эксплуатации изделий. Случайные отказы возникают из-за неблагоприятного сочетания множества различных факторов. В надежности в основном рассматриваются случайные отказы.

При классификации отказов необходимо различать классификацию, проведенную для правильного применения математического аппарата теории надежности, и классификацию, проведенную для применения её в инженерном анализе.

Отказы с позиций применения законов теории вероятности подразделяются на постепенные и внезапные, совместные и несовместные, зависимые и независимые.

Внезапные отказы характеризуются скачкообразным изменением некоторого параметра изделия и для них считается, что факт возникновения отказа не связан со временем функционирования изделия.

Постепенные отказы связаны с общим временем функционирования изделия и происходят при постепенном изменении некоторого его параметра. Однако постепенное изменение параметра в конечном счете может также приводить к скачкообразному изменению свойств технического изделия. Такая ситуация, например, наблюдается при изнашивании узла трения, накоплении усталостных или коррозионных повреждений и т.д.

Совместимыми называются отказы отдельных элементов изделия, которые одновременно появляются при их работе.

Независимые отказы определяются тем, что вероятность их возникновения не зависит друг от друга.

С точки зрения инженерного анализа выявления причин возникновения отказа принята следующая классификация.

1. По месту проявления отказа (в полете или на земле).
2. По их последствиям (летное происшествие, невыполнение полетного задания или без последствий).
3. По причинам возникновения (конструкционный, производственный, эксплуатационный из-за внешних или случайных причин, эксплуатационный из-за ошибок наземного технического персонала, эксплуатационный из-за ошибок летного состава).
4. По способу устранения (восстановление на месте эксплуатации, восстановление в ремонтных организациях, списание).

В зависимости от периода эксплуатации изделия выделяют отказы, возникающие в начальный период (приработочные отказы), в период нормального функционирования и в период естественного старения материалов конструкции.

Кроме того, отказы подразделяют на отказы функционирования, при которых выполнение своих функций изделием прекращается, и параметрические отказы, при которых значения некоторых параметров изделия достигли оговоренных допусков, но само изделие еще могло бы выполнять свои функции. Отказы функционирования могут быть внезапными и постепенными, но обязательно приводят к прекращению выполнения своих функций изделием. Этим определяется особая опасность отказов функционирования. В параметрических отказах такой внезапной остановки работы изделия нет. В связи с этим важной задачей науки о надежности является разработка диагностических методов, позволяющих перевести отказы функционирования в параметрические. Например, постоянный контроль содержания металла (частиц износа) в смазочном материале узла трения позволяет прогнозировать изнашивание узла трения и исключить его заклинивание и создание условий для возникновения другого совместного отказа функционирования. Также весьма перспективными являются методы акустической эмиссии определения общего объема, накоплений микроповреждений конструкции.

Вероятность распределения отказов и её числовые характеристики.

При многократных наблюдениях за случайными событиями выявляется, что они подчиняются определенным закономерностям. Эти закономерности описываются законами теории вероятности.

Одним из главных вопросов всей проблемы надежности технических изделий является изучение отказов этих изделий как случайных событий. Случайные события (например, отказы) количественно характеризуются случайными величинами. Так, продолжительность функционирования изделия характеризуется наработкой до отказа. Наработка до отказа может измеряться временем до отказа или объемом выполненной им работы. В этом случае случайным событием является отказ, который количественно может характеризоваться временем до отказа, пройденным расстоянием до отказа или перевезенным объемом груза и т.д. Случайным событием является результат измерения или результат выполнения технологической операции. Тогда соответствующей случайной величиной может быть геометрический размер детали, полученный при её изготовлении, или зазор между сопрягаемыми поверхностями и т.д.

Случайная величина может быть непрерывной (время, длина и т.д.) или принимать дискретные значения (число отказов). Из-за невозможности заранее указать, какое конкретное значение примет

случайная величина, для её характеристики вводится понятие вероятности.

Вероятность - это численная мера объективно существующей возможности появления (или непоявления) изучаемого события А, которая обычно обозначается через $P(A)$.

Если случайная величина может принимать конечное число (более двух) дискретных значений или бесконечное число непрерывных значений, то для её характеристики необходимо использовать функцию распределения вероятности (ФРВ) случайной величины.

По определению ФРВ некоторой случайной величины ξ, имеющей множество реализаций $[a_н, a_в]$, называется вероятность того, что случайная величина ξ принимает на этом множестве значения меньше, чем значение некоторой детерминированной величины x, т.е.

$$F(x) = P(\xi < x) . \qquad (12.1)$$

Все множество реализаций случайной величины ξ называется генеральной совокупностью, верхняя $a_в$ и нижняя $a_н$ границы которого могут принимать различные значения. Например, пусть какое-нибудь изделие начинает работать в момент времени $t=0$, а в некоторый момент времени $t=T$ возникает случайное событие - отказ изделия. Тогда множество реализаций этих событий характеризуется количественно множеством значений, которое может принимать случайная величина T. Это множество (генеральная совокупность) имеет границы $a_н=0$, $a_в=+\infty$. В теории надежности величина T получила название наработка до отказа, а ФРВ функции распределения отказов или просто функции отказов:

$$F(t)=P(T<t). \qquad (12.2)$$

Чтобы выяснить смысл и основные свойства функции отказов, рассмотрим опытно-статистический способ её получения. При проведении испытаний технического изделия на испытание можно поставить только некоторое конечное число N таких изделий. Пусть все изделия начинают работать с момента времени $t=0$, а в моменты времени $T_1 \le T_2 \le \ldots \le T_N$ произошли их отказы. Такие испытания, в которых все N изделий отработали до отказа, называются полными. Полученный конечный набор значений $\{T_i\}$ случайной величины T называется выборкой из генеральной совокупности, а число N - объемом выборки. Очевидно, что если мы возьмем следующий набор таких изделий, изготовленных в тех же условиях, и проведем такие же испытания, то получим выборку $\{T_i'\}$, состоящую из других значений. Поэтому все числовые характеристики, полученные из случайной выборки, также будут случайными (статистическая оценка), но будут группироваться около числовой характеристики, вычисленной с использованием всей генеральной совокупности.

Разобъем интервал $[0, T_N]$ на m интервалов одинаковой продолжительности Δt таким образом, чтобы в каждом из них было

не менее двух значений T_i. Тогда вероятность наступления отказа на некотором k-ом интервале $t\in[(k\text{-}1)\Delta t,\ k\Delta t]$ оценивается частостью, равной:

$$\hat{P}_K = \Delta n_K / N \ , \qquad (12.3)$$

где Δn_K - число изделий, отказавших на k-ом интервале.

Статистической оценкой вероятности наступления отказа в интервале от $t=0$ до $t=k\Delta t$ будет величина:

$$\hat{F}_K = \sum_{i=1}^{i=k} \hat{P}_i \ . \qquad (12.4)$$

Если бы мы увеличили число испытываемых изделий до $N\to\infty$, а интервал разбиения времени $\Delta t\to 0$, то ступенчатая гистограмма (12.4) перешла бы в непрерывную кривую, которая по определению и давала бы изображение функции распределения отказов $F(t)$. Из построения гистограммы видно, что функция распределения отказов дает вероятность возникновения отказа в рассматриваемый промежуток времени. Например, вероятность возникновения отказа на интервале $t_H \le t \le t_B$ равна:

$$P\left(t_H \le T < t_B\right) = F\left(t_B\right) - F\left(t_H\right) \ . \qquad (12.5)$$

Кроме того, очевидно, что $F(0)=0$ и $F(\infty)=1$, а сама функция $F(t)$ является монотонной неубывающей функцией на области своей реализации.

В практических расчетах на надежность с помощью специальной процедуры стараются всегда перейти от ступенчатой функции оценки распределения отказов к непрерывной функции отказов, которую также называют теоретической функцией распределения отказов. Это связано со следующими обстоятельствами.

1. Функции распределения отказов служат исходным материалом для расчета показателей надежности, а такие расчеты всегда удобнее проводить с непрерывными функциями. Тем более, что расчетные соотношения для конкретных видов теоретических распределений собраны в специальные таблицы (см. табл.12.1 и 12.2).
2. Несмотря на большое разнообразие технических изделий, а следовательно бесконечное множество экспериментальных распределений, все они сводятся к небольшому числу теоретических распределений (см.п.12.3).

Дифференциальной характеристикой функции распределения отказов является плотность функции распределения и интенсивность распределения отказов. Плотность распределения отказов и её статистическая оценка определяются следующим соотношением:

$$f(t) = \frac{dF}{dt} \ , \quad \hat{f}_K = \frac{\Delta n_K}{N \Delta t_K} \ , \qquad (12.6)$$

где Δn_K - число отказов на Δt_K интервале времени.

Зная $f(t)$, можно решать обратную задачу

$$F(t) = \int_0^t f(\zeta)d\zeta \ . \qquad (12.7)$$

При выводе соотношения (12.7) из (12.6), использовано условие $F(0)=0$. Если ФРВ задана на другом множестве реализаций, например (12.1), то в (12.6) дифференцирование проводится по x.

Интенсивность распределения отказов $\lambda(t)$ определяется как условная плотность распределения отказов невосстанавливаемого изделия, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не наступил.

Статистическая оценка интенсивности отказов определяется из соотношения:

$$\hat{\lambda}_K = \Delta n_K \Big/ \left[\Delta t_K \left(N - \sum_{i=1}^{k-1} \Delta n_i \right) \right]. \qquad (12.8)$$

Интенсивность отказов в отличие от плотности распределения является дифференциальной характеристикой, учитывающей только возможность возникновения отказа в рассматриваемый момент времени, без учета предыстории функционирования изделия.

Из (12.8), совершив предельный переход $\Delta t \to 0$, $N \to \infty$, можно после несложных преобразований получить:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \ . \qquad (12.9)$$

Закон распределения всегда представляет собой некоторую функцию, указание которой полностью описывает случайную величину с вероятностной точки зрения.

Однако, во многих практических вопросах нет надобности в таком полном описании, а достаточно бывает указать только некоторые отдельные численные параметры, характеризующие существенные черты распределения. Кроме того, сравнивать две функции между собой часто некорректно, в то же время сравнение двух числовых параметров позволяет сделать заключение о наиболее эффективном изделии.

Основными числовыми характеристиками ФРВ являются: математическое ожидание, дисперсия, коэффициент вариации и квантиль.

Математическое ожидание непрерывной случайной величины (12.2) определяется одним из следующих соотношений:

$$M[t] = m_t = \int_0^\infty t f(t)dt = \int_0^\infty t dF \qquad (12.10)$$

Видно, что математическое ожидание - это число, имеющее размерность случайной величины.

Дисперсия непрерывной случайной величины характеризует её рассеяние вокруг математического ожидания и определяется следующими выражениями:

$$D[t] = d_t = \int_0^\infty (t - m_t)^2 f(t)dt = \int_0^\infty (t - m_t)^2 dF \ . \qquad (12.11)$$

В практических расчетах часто вместо дисперсии используют стандартное отклонение σ_t, имеющее ту же размерность, что и случайная величина. Стандартное отклонение равно $\sigma_t = \sqrt{d_t}$.

Рассеяние случайной величины вокруг её математического ожидания в относительных единицах (долях математического ожидания) характеризуется коэффициентом вариации:

$\upsilon_t = \sigma_t / m_t$.

Квантиль порядка α случайной величины, имеющей ФРВ $F(t)$, это такое значение случайной величины, при котором функция распределения этой величины принимает значение, равное α, т.е. квантиль t_α является корнем уравнения:

$$F(t_\alpha) = \alpha \ . \qquad (12.12)$$

Квантиль порядка α=0,5 называется медианой распределения, так как делит площадь под графиком функции плотности распределения пополам.

Модой случайной величины является такое значение квантиля, которое соответствует максимальному значению плотности распределения.

Отметим, что к числовым характеристикам распределений относятся также моменты случайной величины.

Безотказность, долговечность, сохраняемость и ремонтопригодность. Единичные и комплексные показатели надежности.

Надежность изделия является сложным свойством, которое в зависимости от назначения изделия и условий его применения состоит из сочетания свойств: безотказности, долговечности, ремонтопригодности и сохраняемости.

Для конкретных изделий и условий их применения эти свойства имеют различную относительную значимость. Например, для некоторых неремонтируемых изделий основным свойством является безотказность. Для ремонтируемых изделий одним из важнейших свойств может быть ремонтопригодность.

Безотказность это свойство изделия непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторой наработки. Безотказность должна быть присуща изделию в любом из режимов его существования (в период работы, хранения и транспортировки),

хотя часто безотказность рассматривается только применительно к режиму эксплуатации.

Долговечность - это свойство изделия сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Из определений видно, что безотказность это свойство, которое характеризует как бы самостоятельную непрерывную работу изделия без каких-либо вмешательств для поддержания его работоспособности. Долговечность это свойство, которое характеризует работу изделия за весь период его жизни с учетом того, что длительная работа изделия невозможна без профилактических мероприятий, восстанавливающих свойство безотказности, утрачиваемое в процессе его эксплуатации.

Ремонтопригодность - это свойство изделия, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения дефектов и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонта. Свойство ремонтопригодности характеризует изделие не только при проведении ремонтов в предельном состоянии, но характеризует его приспособленность для профилактических мероприятий и восстановления после возникновения дефекта.

Сохраняемость это свойство изделия сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтопригодности в течение его хранения и транспортировки и после них. Сохраняемость характеризует свойство изделия противостоять отрицательным условиям хранения и транспортировки и представляется в виде двух составляющих: одна из них проявляется во время хранения и транспортировки, а другая - во время применения объекта после его хранения и транспортировки. Эта вторая составляющая имеет особенно существенное значение, так как хранение или транспортировка может повлиять на составляющие надежности изделия.

Каждое из перечисленных свойств надежности характеризуется набором показателей, которые количественно задают, в какой степени эти свойства присущи конкретному объекту.

Рассмотрим основные показатели надежности.

Безотказность характеризуется следующими показателями: вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа, гамма-процентная наработка до отказа, интенсивность отказов, средняя наработка на отказ, параметр потока отказов. Вероятность безотказной работы P_H это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ изделия не возникает. Используя (12.2) и тот факт, что отказ и безотказная работа образуют полную группу независимых событий, получаем:

$$P_H(t)=1-F(t)=1-P(T<t)=P(T\geq t)\,, \qquad (12.13)$$

где через $P_H(t)$ обозначена вероятность безотказной работы, которую иногда называют функцией надежности.

Вероятность безотказной работы выражается через плотность распределения на основе соотношения:

$$P_H(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^\infty f(t)dt \ . \qquad (12.14)$$

Очевидно, что $P_H(0)=1$, а $P_H(\infty)= 0$.

Важным обстоятельством вероятности безотказной работы является то, что указание её значения без указания пределов наработки не имеет смысла. Как видно из рис.12.2, у одного и того же изделия вероятность безотказной работы $P_H(T_\gamma)=\gamma$, рассматриваемая в период наработки $[0, T_\gamma]$, во много раз больше вероятности безотказной работы $P_H(T_{\gamma 1})=\gamma_1$, рассматриваемой за период наработки $[0, T_{\gamma 1}]$ при $T_{\gamma 1}>T_\gamma$.

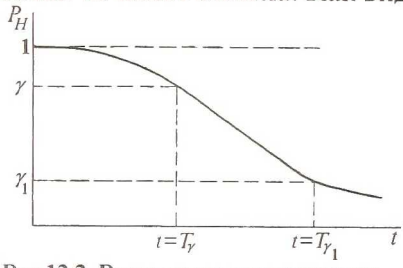


Рис.12.2. Распределение вероятности безотказной работы

Для режимов хранения и транспортировки могут также использоваться термины вероятность безотказного хранения или вероятность безотказной транспортировки.

Средняя наработка до отказа это математическое ожидание наработки изделия до отказа, т.е.

$$m_t = \int_0^\infty tf(t)dt = \int_0^\infty tdF(t) = \int_0^\infty P_H(t)dt \ . \qquad (12.15)$$

Показатель средняя наработка до отказа может применяться не только в период эксплуатации изделия, но и в период его хранения и транспортировки.

Гамма-процентная наработка до отказа это наработка, в течение которой отказ изделия не возникает с вероятностью γ, выраженной в процентах, т.е. гамма-процентная наработка это квантиль функции распределения вероятности безотказной работы, определяемый как корень одного из уравнений:

$$P(T_\gamma)=10^{-2}\gamma \text{ или } \int_{T_\gamma}^\infty f(t)dt = 10^{-2}\gamma \ . \qquad (12.16)$$

Гамма-процентная наработка для двух значений γ и γ_1 представлена на рис.12.2.

Интенсивность отказов это условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого изделия, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник. Используя (12.9), получаем:

$$\lambda(t)=\frac{f(t)}{1-F(t)}=-\frac{1}{P_H(t)}\cdot\frac{dP_H}{dt}\ . \qquad (12.17)$$

Средняя наработка на отказ это отношение наработки восстанавливаемого изделия к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки. Средняя наработка на отказ и параметр потока отказов используются в качестве показателя безотказности восстанавливаемого изделия, например, технологического оборудования или обрабатывающего инструмента. Эксплуатация таких изделий может быть описана следующим образом. В начальный момент времени изделие начинает работу и работает до отказа, после отказа происходит его восстановление и изделие вновь работает до отказа. Моменты отказов на оси суммарной наработки или на оси непрерывного времени образуют поток отказов. В качестве характеристики потока отказов используют ведущую функцию $\Omega(t)$ данного потока - математическое ожидание числа отказов за время t, т.е.:

$$\Omega(t)=M[r(t)]\ , \qquad (12.18)$$

где M символ математического ожидания; $r(t)$ число отказов за время t. Поэтому средняя наработка на отказ T_{CP} будет определяться из соотношения

$$T_{CP}(t)=\frac{t}{\Omega(t)}=\frac{t}{M[r(t)]}\ . \qquad (12.19)$$

Поток отказов также характеризуют параметром потока отказов $\omega(t)$ отношением среднего числа отказов восстанавливаемого изделия за произвольно малую его наработку к значению этой наработки, т.е.:

$$\omega(t)=\frac{d\Omega(t)}{dt}\ . \qquad (12.20)$$

Потоки отказов могут быть простыми или сложными, состоящими из простых. Поскольку среднее число отказов (математическое ожидание) Ω за наработку t для сложного потока обладает свойством аддитивности, то параметр потока отказов также обладает аддитивностью. Это свойство часто используют при анализе отказов различных элементов и систем сложных изделий, например, разбивая поток отказов на потоки отказов от механических, гидравлических, электрических и т.д. систем.

При рассмотрении наработок меньших m_t параметр потока отказов зависит от t и вида функции распределения. При $t>>m_t$ происходит стабилизация ω и $\omega\cong 1/m_t$.

Долговечность изделия характеризуется следующими показателями: ресурсом (средним, гамма-процентным, назначенным, техническим); сроком службы (средним, гамма-процентным, назначенным).

Ресурс или **технический ресурс** это наработка изделия от начала его эксплуатации или её возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние. **Срок службы** же определяется календарной наработкой до перехода в предельное состояние.

Поскольку средний или капитальный ремонт позволяет частично или полностью восстановить ресурс, отсчет наработки, образующей ресурс, возобновляют по окончании такого ремонта, различая в связи с этим доремонтный, межремонтный, послеремонтный и полный (до списания) ресурс.

Доремонтный ресурс исчисляется до первого ремонта. Число возможных видов межремонтного ресурса зависит от чередования капитальных и средних ремонтов. Послеремонтный ресурс отсчитывается от последнего ремонта.

Аналогичным образом выделяют виды срока службы.

Средний ресурс и средний срок службы - это математическое ожидание ресурса или срока службы, соответственно.

Гамма-процентный ресурс (гамма-процентный срок службы) - это наработка (календарная продолжительность) от начала эксплуатации, в течение которой он не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ, выраженной в процентах. Гамма-процентный ресурс в случае аналитического задания вероятности безотказной работы определяется из соотношения (12.16) или графически из рис.12.2. Из этих соотношений следует, что увеличение вероятности безотказной работы изделия без его совершенствования возможно только за счет уменьшения гамма-процентного ресурса.

Назначенный ресурс (срок службы) определяется суммарной наработкой (календарной продолжительностью эксплуатации) изделия, при достижении которой его применение по назначению должно быть прекращено. Цель установления назначенного ресурса или назначенного срока службы - обеспечение принудительного заблаговременного прекращения применения изделия по назначению, исходя из требований безопасности или экономического анализа.

Для объектов, подлежащих длительному хранению, может быть установлен назначенный срок хранения, по истечении которого дальнейшее хранение недопустимо. При достижении изделием назначенного ресурса или срока службы, в зависимости от его назначения, особенностей эксплуатации, технического состояния и других факторов изделие может быть: списано; направлено в средний или капитальный ремонт; передано для применения не по назначению; принято решение о продолжении эксплуатации.

Ремонтопригодность изделия характеризуется следующими показателями: вероятностью восстановления, средним временем восстановления и средней трудоемкостью восстановления работоспособного состояния.

Вероятность восстановления работоспособного состояния - это вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния изделия не превысит заданного времени.

Среднее время (средняя трудоемкость) восстановления работоспособного состояния это математическое ожидание времени (трудоемкости) восстановления работоспособного состояния.

Время восстановления отсчитывают либо непрерывно, либо из него по определенным правилам исключают интервалы времени, не обусловленные непосредственно выполнением восстановительных работ. В связи с этим различают общее время и оперативное время восстановления работоспособности изделия.

Сохраняемость характеризуется средним и гамма-процентным сроком сохраняемости.

Средний срок сохраняемости определяется как математическое ожидание срока сохраняемости, а гамма-процентный срок сохраняемости срок сохраняемости, достигаемый изделием с заданной вероятностью γ, выраженной в процентах.

Необходимо отметить, что показатели безотказности и долговечности определялись на основе функции распределения отказов (или функции надежности), в то же время для ремонтопригодности необходимо знание функции распределения вероятности времени восстановления, а для сохраняемости функции распределения срока сохраняемости.

К комплексным показателям надежности относят: коэффициент готовности; коэффициент оперативной готовности; коэффициент технического использования; коэффициент планируемого применения; коэффициент сохранения эффективности.

12.3.Математические модели отказов технических систем

Прогнозировать потерю работоспособности любого изделия можно только тогда, когда создана математическая модель процесса потери работоспособности. В общем случае математическая модель это совокупность математических объектов (чисел, переменных, функций, множеств и т.д.) и заданных отношений между этими объектами [18]. Применительно к задачам теории надежности изделий такая математическая модель представляет собой совокупность аналитических, графических и табличных зависимостей выходных параметров от входных, управляющих и возмущающих (внешних воздействий) параметров, а также параметров состояния изделия. Причем, в отличие от физико-химических, технологических или конструктивных моделей [14] математические модели теории надежности обладают повышенной сложностью, так как включают в себя все перечисленные модели.

В качестве примера рассмотрим процесс потери работоспособности типичного узла "вал-опоры" при износе подшипников [57]. К такому узлу обычно предъявляются требования к точности вращения вала по двум основным параметрам $x_1=e$ - радиальное биение вала (эксцентриситет вращения) и $x_2=\varphi$ - угол наклона оси вала. Входными параметрами будут начальные значения e_0 и φ_0, зависящие от технологии изготовления и монтажа вала и его опор.

При работе вала наблюдается износ подшипников, который приводит к тому, что выходные значения параметров функционирования x_1 и x_2 будут функциями времени. Значения выходных параметров $x_1(t)$ и $x_2(t)$ зависят от величины и характера внешних воздействий, конструктивных особенностей узла (материалы, смазка и т.д.), условий его эксплуатации и используемых режимов функционирования. Для описания влияния этих воздействий на выходные параметры в физике отказов вводятся понятия степень повреждения U и скорость повреждения материала:

$$\gamma = \frac{dU}{dt} = \varphi\left(z_1, z_2, \ldots, z_n, t\right), \qquad (12.21)$$

где параметры z_i характеризуют условия эксплуатации и внешние воздействия (нагрузки, скорости, температуры), состояние материала (твердость, прочность, качество поверхности и т.д.) и другие факторы, влияющие на протекание процесса повреждения материала.

Однако при наличии только функциональной зависимости (12.21), достаточно достоверно описывающей данное явление, нельзя еще точно предсказать, как будет протекать данный процесс, так как сами аргументы являются случайными величинами. Действительно, при работе изделия происходят случайные изменения и колебания нагрузок, скоростей, температур, степени загрязнения поверхности и т.д. Более того, сами детали изготовлены с различными допусками на технологические параметры, а сами материалы имеют допуски на разброс физико-химических параметров.

Таким образом, установление зависимости:

$$x_i = \Psi(U) = \Psi\left(U\left(z_1, z_2, \ldots, z_n, t\right)\right) = \Psi\left(z_1, z_2, \ldots, z_n, t\right) \qquad (12.22)$$

дает математическую модель функционирования изделия и детерминированные законы изменения параметров функционирования x_i. Установление же законов рассеяния параметров z_i, например, в виде функций распределения вероятностей $F(z_i)$ (или плотностей распределения вероятностей $f(z_i)$) позволяет найти функции распределения вероятностей параметров функционирования $F(x_i)$ (или соответственно их плотностей $f(x_i)$) и построить математическую модель:

$$X_i = \Psi(Z_1, Z_2, \ldots, Z_n, t), \qquad (12.23)$$

в отличие от (12.22) функциональная зависимость (12.23) описывает связь между случайными величинами Z_i и X_i. Это отличие обычно

подчеркивается тем, что в написании случайных величин используются заглавные буквы (12.23), а в написании детерминированных величин (12.22) используются прописные буквы. Кроме того, для каждой случайной величины Z_i должно быть задано распределение $f(z_i)$.

Переход к математической модели (12.23) основывается на установлении взаимосвязи между распределениями z_i и x_i в виде некоторой зависимости, т.е. аналитически математическая модель (12.23) может быть представлена в виде:

$$x_i = \Psi(z_1, z_2, \ldots, z_n, t),$$
$$f(x_i) = \Psi_1(f(z_1), f(z_2), \ldots, f(z_n), t). \qquad (12.24)$$

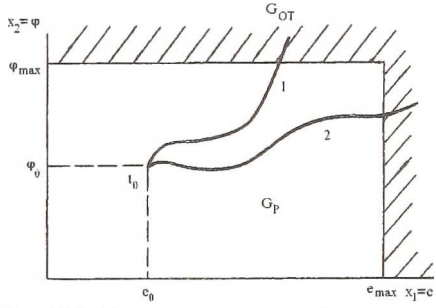


Рис.12.3. Диаграмма реализаций потери работоспособности узла "вал-опоры" по параметрам $x_1=\varphi$ и $x_2=e$

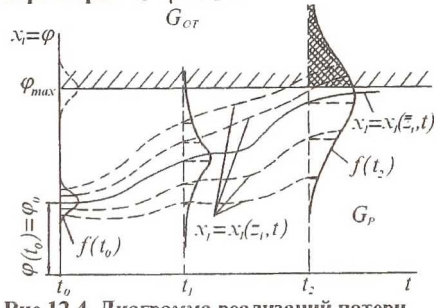


Рис.12.4. Диаграмма реализаций потери работоспособности узла "вал-опоры" по параметру $x_1=\varphi$

Отличие детерминированной и статистической моделей продемонстрировано на рис.12.3, 12.4.

На рис.12.3 показаны две реализации процесса потери работоспособности узла "вал-опора" Предельное состояние (отказ) наступит, если любой из параметров превзойдет допустимые значения e_{max} и φ_{max}, указанные в технических условиях на эксплуатацию изделия. Область работоспособности изделия представлена на рис.12.3 множеством точек G_P, а область потери работоспособности множеством точек G_{OT} (заштрихованная область). В зависимости от значений z_i траектория $\bar{x}(t)$ будет иметь различный вид (рис.12.3, реализации *1* и *2*).

Однако, при испытании узлов, изготовленных по одинаковым технологиям, траектории реализации будут отличаться. В связи с этим и является необходимым рассмотрение математических моделей потери работоспособности в статистической постановке. В этом случае необходимо учитывать, что начальное значение параметра φ (рис.12.4) имеет определенное рассеяние $f(t_0)$ относительно своего математического ожидания $\varphi(t_0)=M[\varphi]=\varphi_0$. Это начальное рассеяние связано с технологией изготовления изделия. Затем, в процессе эксплуатации изделия происходит повреждение материалов изделия из-за различных физико-химических механизмов. Причем, одни виды

повреждения могут сразу влиять на изменение математического ожидания и дисперсии выходного параметра, другие после накопления определенной степени повреждения (например, усталость). В результате этих явлений происходит изменение закона распределения выходного параметра $f(t_0) \rightarrow f(t_1) \rightarrow f(t_2) \rightarrow \ldots$ (см. рис.12.4). Из рис.12.4 видно, что начиная с какого-то момента времени (этот момент может совпадать и с t_0) кривая распределения пересекает границу допустимых значений φ_{max}. Площадь под кривой распределения выше линии φ_{max} и характеризует вероятность возникновения отказа. Таким образом, детерминированная (см. рис.12.3) математическая модель должна быть заменена статистической (см. рис.12.4), позволяющей предсказать вероятность возникновения отказа после определенного периода эксплуатации изделия. Кроме того, на рис.12.4 показано, что предельно допустимое значение параметра φ_{max} также может иметь рассеяние.

Решение сформулированных статистических моделей в общем случае представляет значительные математические трудности. Это связано со следующими обстоятельствами.

ЛА имеет примерно $10^3 \ldots 10^6$ деталей. Число отдельных параметров, определяющих качество детали и её положение в изделии (размеры, допуски, характеристики материала и т.д.), равно примерно 10^2. Таким образом, летательный аппарат в целом характеризуется $10^5 \ldots 10^8$ параметрами. Несоответствие хотя бы одного из них номинальным значениям может привести к отказу всего изделия. Кроме того, каждый из этих параметров является случайной величиной, которая через функциональную зависимость (12.23) зависит от большого числа других случайных параметров.

Поэтому в теории надежности разработаны специальные подходы, позволяющие упростить решение поставленных задач.

Основные распределения теории надежности. Модели формирования внезапных и постепенных отказов.

В соответствии с методологией предыдущего раздела рассмотрим элементы технического изделия, при функционировании которых могут возникать внезапные и постепенные отказы.

Причина возникновения внезапных отказов не связана с изменением состояния изделия и временем его предыдущей работы, а зависит от неблагоприятного сочетания множества факторов. При возникновении внезапных отказов интенсивность отказов λ (показатель безотказности) практически не зависит от времени.

Возникновение постепенных отказов определяется процессом постепенного накопления повреждений в изделии и схема формирования постепенного отказа была представлена на рис.12.4.

На практике установлено, что изменение интенсивности отказов в течение всего жизненного цикла изделия можно представить

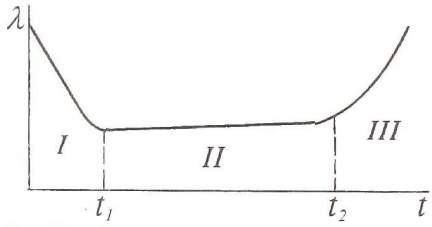


Рис.12.5. Зависимость интенсивности отказа изделия от времени его эксплуатации

обобщенной зависимостью в виде рис.12.5. На этой зависимости можно выделить три различных участка. На первом участке, называемом периодом приработки, интенсивность отказов в зависимости от времени эксплуатации уменьшается. В этот период выявляются и устраняются случайные отказы, вызванные явными ошибками производства (неправильная регулировка, неточная сборка и т.д.), отказы, связанные с отклонениями фактических условий работы и нагрузок от предполагаемых при выполнении проектных работ, а также отказы, связанные с приработкой различных узлов и сопряжений.

Период приработки обычно включают в продолжительность обкаточных или приработочных испытаний.

На втором участке интенсивность отказов для эффективного технического изделия остается примерно постоянной. Этот период получил название периода нормальной эксплуатации. В этот период постепенные отказы еще не проявляются, а могут возникать только внезапные отказы.

Третий период получил название периода естественного старения материалов. В этот период кроме случайных отказов начинают возникать постепенные отказы, вызванные накоплением износных, коррозионных, усталостных, деструкционных и других повреждений. Вероятность возникновения отказа изделия с течением времени возрастает, поэтому эксплуатация изделия становится небезопасной или нерентабельной и поэтому должна быть прекращена. Изделие направляется в ремонт или списывается.

Установим зависимость от времени вероятности безотказной работы, используя в качестве основного параметра интенсивность отказов. С этой целью используем соотношение (12.17) для интенсивности отказов, из которого получим дифференциальное уравнение.

Проведя интегрирование левой и правой части этого уравнения с учетом того факта, что $P_H(0)=1$, получим:

$$P_H(t) = \exp\left\{-\int_0^t \lambda(t)dt\right\} \qquad (12.25)$$

Соотношение (12.25) получило название основного уравнения теории надежности.

Для периода нормальной эксплуатации $\lambda=\text{const}$. Подставляя это значение в (12.25), получим экспоненциальный закон теории надежности:

$$P_H = e^{-\lambda t} \qquad (12.26)$$

Используя соотношения п.12.2, можно записать функцию распределения отказов и плотность распределения вероятности в виде:

$$F(t) = 1 - P_H(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad f(t) = \frac{dF}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}.$$

Распределение (12.26) является однопараметрическим, так как зависит от одного параметра λ, который выражается через математическое ожидание и дисперсию на основе следующих соотношений:

$$m_t = \frac{1}{\lambda}, \; d_t = \frac{1}{\lambda^2}.$$

В связи с простотой аналитического выражения экспоненциальное распределение нашло очень широкое применение в теории надежности. Его применяют:

- для всех систем в период нормального функционирования при возникновении только внезапных отказов;
- для всех систем при рассмотрении небольших отрезков времени, на которых можно считать $\lambda \equiv \text{const}$;
- сложных систем, состоящих из большого числа элементов.

В тех случаях, когда у изделия возникают постепенные отказы, параметр λ можно аппроксимировать некоторой степенной функцией времени и получить распределение вероятности для описания математических моделей возникновения постепенных отказов. Основные виды таких распределений, используемых в теории надежности, представлены в табл.12.1. В таблице использованы общепринятые обозначения: $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx$ - интеграл ошибок;

$\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt$ - гамма-функция.

Обычно с помощью приведенных распределений решают две основные задачи.

1. Определение вероятности безотказной работы в течение заданной наработки t.
2. Определение средней наработки до отказа, обеспечивающей вероятность безотказной работы не менее γ (гамма-процентный ресурс).

Как уже отмечалось, при проведении испытаний на надежность используется выборка из генеральной совокупности. При этом достоверность результата зависит от объема выборки и, кроме

Таблица 12.1.

Основные непрерывные распределения теории надежности

№	Название распределения	Область значений	Плотность распределения	Функция распределения вероятности	Математическое ожидание	Дисперсия
1.	Равномерное	(a, b)	$\frac{1}{b-a}$	$\frac{x-a}{b-a}$	$\frac{a+b}{2}$	$\frac{(b-a)^2}{12}$
2.	Нормальное (Гаусса)	$(-\infty, \infty)$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}$	$0{,}5+\Phi\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)$	a	σ^2
3.	Логарифмическое нормальное	$(0, \infty)$	$\frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t-a)^2}{2\sigma^2}}$	$0{,}5+\Phi\left(\frac{\ln t-a}{\sigma}\right)$	$e^{a+\frac{\sigma^2}{2}}$	$e^{2a+\sigma^2}\left(e^{\sigma^2}-1\right)$
4.	Вейбулла	$(0, \infty)$	$\frac{m}{t_0} t^{m-1} e^{-\frac{t^m}{t_0}}$	$1-e^{-\frac{t^m}{t_0}}$	$t_0^{\frac{1}{m}}\Gamma\left(1+\frac{1}{m}\right)$	$t_0^{\frac{2}{m}}\left[\Gamma\left(1+\frac{2}{m}\right)-\Gamma^2\left(1-\frac{1}{m}\right)\right]$
5.	Экспоненциальное	$(0, \infty)$	$\lambda e^{-\lambda t}$	$1-e^{-\lambda t}$	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\lambda^2}$
6.	χ^2-распределение	$(0, \infty)$	$\frac{1}{2^{\frac{\nu}{2}}\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)}\left(\chi^2\right)^{\frac{\nu}{2}-1} e^{-\frac{\chi^2}{2}}$	$\int_0^{\chi^2} f\left(\chi^2\right)d\chi$	ν	2ν
7.	Стьюдента	$(-\infty, \infty)$	$\frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\sqrt{\pi\nu}\,\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)}\left(1+\frac{x^2}{\nu}\right)^{-\frac{\nu+1}{2}}$	$2\int_0^{x} f(x)dx$	0	$\frac{1}{\frac{\nu}{2}-2}$

того, важным практическим вопросом является вопрос о числе изделий, которые необходимо поставить на испытание. В этих случаях в теории надежности используются дискретные распределения. Основными из них являются биномиальное, геометрическое и Пуассона. Свойства этих распределений и их числовые характеристики приведены в табл.12.2, где $C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$.

Таблица 12.2.

Основные дискретные распределения теории надежности

Распределение	Область значений	Функция распределения вероятностей	Математическое ожидание	Дисперсия
Биноминальное	0, 1, 2, …, n	$P_n(m) = C_n^m p^m q^{n-m}$	np	npq
Пуассона	0, 1, 2, …	$P_m = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda}$	λ	λ
Геометрическое	0, 1, 2, …	$P_m = pq^{m-1}$	$1/p$	q/p^2

Моделирование сложных технических систем прямым аналитическим методом.

В предыдущем разделе при построении функций распределения некоторого параметра элемента мы не учитывали, что этот параметр может быть функцией большого числа аргументов z_i, распределенных с некоторыми плотностями вероятности $f(z_i)$. Необходимость решения задач такого типа в теории надежности возникает всегда, когда надо ответить на следующие вопросы:

1. Из-за каких причин получена недостаточная надежность элемента или изделия ?
2. Каким образом можно повысить показатели надежности?

Сформулируем задачу моделирования следующим образом. Выходной параметр x некоторого технического элемента является случайной величиной, зависящей через функциональную зависимость

$$X=\varphi(Z_1, \ldots, Z_n)$$

от случайных аргументов $Z_1 \ldots Z_n$. Из результатов исследований известны плотности распределения $f(z_1) \ldots f(z_n)$. Требуется найти плотность распределения $f(x)$.

Необходимо отметить, что в замкнутом аналитическом виде решение такой задачи может быть получено только в некоторых частных случаях.

Рассмотрим некоторые из этих случаев, имеющих важное значение для практических задач теории надежности.

Пусть выходной параметр X является известной функцией $X=\varphi(Z)$ случайной величины Z с известной плотностью распре-

деления $f_z(z)$. Для определения показателей надежности по параметру X требуется знать её плотность распределения вероятности $f_x(x)$. Решение данной задачи дается следующим соотношением:

$$f_x(x) = f_z(z)\left|\frac{dz}{dx}\right| = f_z\left(\varphi^{-1}(x)\right)\left|\frac{d\varphi^{-1}(x)}{dx}\right| . \qquad (12.27)$$

где $Z=\varphi^{-1}(X)$ - функция обратная к $X=\varphi(Z)$.

Например, контактные напряжения σ_H на рабочих поверхностях зубьев прямо пропорциональны квадратному корню из крутящего момента М, т.е. $\sigma_H = a\sqrt{M}$. Требуется определить плотность распределения контактных напряжений, если крутящий момент распределен по нормальному закону с параметрами m и σ. Найдя обратную функцию φ^{-1} из соотношения $M=\sigma_H^2/a$ и проведя вычисления по (12.27), получим:

$$f_\sigma\left(\sigma_H\right) = \frac{2\sigma_H}{a^2\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{\left(\sigma_H - a^2 m\right)^2}{2a^2\sigma^2}\right\} .$$

Таким образом, видно, что даже в этом простом случае распределение контактных напряжений отличается от нормального закона, несмотря на то, что распределение нагрузки нормально.

Можно доказать, что только в случае зависимости $X=aZ+b$ и нормального закона распределения величины Z функция распределения величины x будет иметь также нормальный закон распределения с параметрами $m_x=am_z+b$, $\sigma_x=|a|\sigma_z$.

Рассмотрим теперь функцию двух случайных аргументов:

$$X=\varphi(Z_1, Z_2) \qquad (12.28)$$

и по известным плотностям распределений $f(z_1)$ и $f(z_2)$ найдем плотность распределения $f_x(x)$.

Поставленная задача решается [19] с помощью следующих соотношений:

$$f_x(x) = \frac{dF(x)}{dx} , \qquad (12.29)$$

$$F(x) = \int_{-\infty}^{\infty}\left(\int_{\varphi(z_1,z_2)<x} f\left(z_1,z_2\right)dz_1\right)dz_2 = \int_{-\infty}^{\infty}\left(\int_{\varphi(z_1,z_2)<x} f\left(z_1,z_2\right)dz_2\right)dz_1 , \qquad (12.30)$$

где область интегрирования на плоскости z_1oz_2 определяется из неравенства

$\varphi(z_1, z_2)<x$.

В случае, если случайные величины Z_1 и Z_2 независимы, то их совместную плотность распределения $f(z_1, z_2)$ можно представить в виде [19]:

$$f(z_1, z_2)=f(z_1)f(z_2) . \quad (12.31)$$

На практике часто возникает ситуация, когда выходной параметр x определяется суммой входных параметров, т.е.:

$$x=z_1+z_2 . \quad (12.32)$$

Найдем плотность распределения параметра x. В соответствии со схемой, изложенной в предыдущем примере, находим область интегрирования $z_1+z_2<x$. Тогда функция распределения x будет иметь вид:

$$F(x)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(\int_{-\infty}^{x-z_1} f(z_1,z_2)dz_2\right)dz_1 . \quad (12.33)$$

Дифференцируя это соотношение по x, получим:

$$f_x(x)=\int_{-\infty}^{\infty} f(z_1,x-z_1)dz_1=\int_{-\infty}^{\infty} f(x-z_2,z_2)dz_2 . \quad (12.34)$$

Если случайные аргументы z_1 и z_2 независимы, то соотношение (12.34) примет вид:

$$f_x(x)=\int_{-\infty}^{\infty} f_1(z_1)f_2(x-z_1)dz_1=\int_{-\infty}^{\infty} f_1(x-z_2)f_2(z_2)dz_2 . \quad (12.35)$$

В случае, когда складываются независимые случайные величины (12.32), говорят о композиции законов распределения.

Как мы уже видели, в случае даже простых функциональных зависимостей между выходными и входными параметрами законы распределения входных параметров претерпевают изменение на выходе системы. Законы распределения, которые при определенных функциональных преобразованиях не претерпевают изменений, носят название устойчивых. Используя (12.35), легко показать, что только при композиции случайных величин $x=z_1+\ldots+z_N$ устойчивыми будут законы нормального распределения, Пуассона и биноминальный закон. Причем распределение выходного параметра будет зависеть от числовых параметров распределения аргументов на основе соотношений: для нормального закона - (табл.12.1); для Пуассона - $\lambda_x=\lambda_1+\ldots+\lambda_N$; для биноминального - параметрами аргументов $(n, m_1)\ldots(n, m_N)$ будут числовые параметры - $(n, m_1+\ldots m_N)$.

Очень важное значение на практике имеет следующее применение соотношения (12.30), получившее название задачи выполнения задания по заданному параметру. Пусть случайная величина x определяется разностью аргументов, т.е.:

$$x=z_1-z_2 . \quad (12.36)$$

Найдем закон распределения выходного параметра x. Для этого используем соотношения закона композиции случайных величин (12.32), обозначив $z_2'=-z_2$. Подставляя это выражение в соотношения (12.34) и (12.35), получим

$$f_x(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(z_1, z_1 - x)dz_1 = \int_{-\infty}^{\infty} f(z_2 - x, z_2)dz_2 \qquad (12.37)$$

или для независимых величин

$$f_x(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(z_1) f_2(z_1 - x)dz_1 = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(z_2 - x) f_2(z_2)dz_2 \ . \qquad (12.38)$$

Полученное соотношение (12.38), так же как и композиция, устойчиво для нормального закона. Поэтому, если случайные величины z_1 и z_2 распределены по нормальным законам с параметрами m_1, σ_1 и m_2, σ_2, то выходная величина x будет также распределена по нормальному закону с параметрами $m_x=m_2-m_1$ и $\sigma_x^2=\sigma_1^2+\sigma_2^2$.

В случае функций, зависящих от большого числа аргументов, все расчетные соотношения значительно усложняются. В связи с этим в теории вероятности разработан приближенный метод нахождения числовых характеристик функции по числовым характеристикам аргументов. Метод основан на линеаризации функции в достаточно узких пределах изменения аргументов. Для этого исследуемая функция раскладывается в ряд Тейлора в окрестности математического ожидания с сохранением дух первых членов и доказывается следующее утверждение: распределение вероятности функции $x=\varphi(z_1, z_2, \ldots, z_N)$ имеет математическое ожидание и дисперсию

$$m_x = \varphi\left(m_{z_1}, m_{z_2}, \ldots, m_{z_N}\right),$$

$$\sigma_x^2 = \sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\partial\varphi}{\partial z_i}\right)^2\Bigg|_{z_i=m_{z_i}} \sigma_{z_i}^2, \qquad (12.39)$$

где m_{z_i} и σ_{z_i} математическое ожидание и дисперсия распределения аргумента z_i.

Надо отметить, что соотношения (12.39) очень широко применяются во многих прикладных расчетах. Однако при их применении допускается ряд неточностей. Во-первых, в соотношении для дисперсии происходит потеря весового множителя $\left(\partial\varphi/\partial z_i\right)^2$ Во-вторых, эти соотношения приближенно точны только в области изменения аргументов около математического ожидания. В-третьих, плотность распределения вероятности величины x может быть приближенно описана нормальным законом также в области около математическо-

го ожидания. Вне этой области закон распределения теряет нормальный вид.

Моделирование сложных технических систем методом структурных схем.

Широкое применение в расчетах на надежность сложных изделий получил метод структурных схем. Сущность метода структурных схем заключается в том, что рассматриваемое изделие или система представляется в виде расчетной схемы, состоящей из отдельных элементов, которые в результате последовательного или параллельного их соединения образуют соответствующую структурную схему. Разбивка сложного изделия на отдельные элементы может быть произведена сколь угодно большим числом способов. Однако при этом необходимо соблюдать следующие принципы.

1. Изделие представляется в виде единой структурной схемы, состоящей из суммы последовательных и параллельных соединений. События, изображенные в виде элементов и звеньев структурной схемы, должны быть независимы.
2. В структурной схеме не должно быть событий, среди которых одно событие является отрицанием другого. Одно и то же событие должно представляться в виде одного звена.

Основой структурных схем являются условные виды последовательных и параллельных соединений звеньев, выражающих событие безотказности действия отдельных элементов системы. Эти виды соединений не всегда совпадают с монтажными названиями соединений.

Последовательным соединением элементов с точки зрения надежности называется такое соединение, при котором для безотказной работы системы требуется безотказная работа всех элементов. Последовательное соединение графически представляют в виде рис.12.6,а.

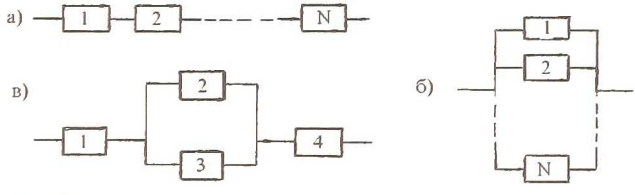


Рис.12.6. Виды соединения элементов по надежности:
а - последовательное, б - параллельное, в - смешанное

Обозначим через Y_i случайное событие, заключающееся в безотказности работы i-го элемента. Тогда событие Y_c, заключающееся в безотказности работы всей системы, наступит тогда и только тогда, когда наступят события Y_1, Y_2, ..., Y_N. Используя независимость событий Y_i и то, что событие Y_c представлено в виде произведения исходных событий, получим для вероятности безотказной работы соотношение

$$P_H(Y_c) = \prod_{i=1}^{N} P_H(Y_i) ,$$

или, обозначая $P_H(Y_c)=P_{H.C}$, $P_H(Y_i)=P_{H.i}$, будем иметь:

$$P_{H.C} = \prod_{i=1}^{N} P_{H.i} . \qquad (12.40)$$

Параллельным соединением элементов с точки зрения надежности называется такое соединение, при котором для безотказной работы системы требуется безотказная работа хотя бы одного элемента. Параллельное соединение графически представлено в виде рис.12.6,б.

Для установления связи между вероятностью безотказной работы системы и вероятностью безотказной работы элемента обозначим через Q_i случайное событие, заключающееся в отказе i-го элемента. Тогда для наступления отказа всей системы Q_c необходимо, чтобы отказали все элементы или наступило событие, равное произведению событий Q_1, Q_2, …, Q_N. Используя независимость событий Q_i и теорему умножения вероятностей, получим для вероятности наступления отказа системы соотношение

$$F_c = P(Q_c) = \prod_{i=1}^{N} P(Q_i) = \prod_{i=1}^{N} F_i$$

или переходя к вероятности безотказной работы $P_H=1-F$, получим:

$$P_{H.C} = 1 - \prod_{i=1}^{N} (1 - P_{H.i}) \qquad (12.41)$$

С помощью последовательного и параллельного соединения элементов можно смоделировать структурную схему для любой технической системы. Например, систему выпуска шасси некоторых самолетов можно представить в виде рис.12.6,в, где элемент *1* моделирует основную гидросистему, элементы *2* и *3* моделируют основную и аварийную системы выпуска шасси, а элемент *4* моделирует шасси. Обозначая вероятности безотказной работы каждого элемента через $P_H(i)$, получим вероятность безотказной работы $P_{H.C}$ для этой системы в виде

$P_{H.C}=P_H(1)P_H(4)[1-(1-P_H(2))(1-P_H(3))]$.

Рассмотрим расчетные формулы для вероятности безотказной работы и средней наработки до отказа сложной системы, состоящей из N элементов, в период нормального её функционирования.

Учитывая, что в период нормального функционирования вероятность безотказной работы i-го элемента подчиняется экспоненциальному закону $P_{H.i}=\exp\{-\lambda_i t\}$, получим для последовательного соединения

$$P_{H.C} = \prod_{i=1}^{N} P_{H.i} = \prod_{i=1}^{N} e^{-\lambda_i t} = e^{-\lambda_C t}, \qquad (12.42)$$

где $\lambda_C = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i$.

В случае $\lambda_1=\lambda_2=\ldots=\lambda_N=\lambda$ будем иметь

$\lambda_C=N\lambda$.

Учитывая связь интенсивности отказов со средней наработкой до отказа $\lambda=1/m_t$, получим что последовательное соединение элементов по надежности очень сильно снижает как вероятность безотказной работы системы, так и среднюю наработку до отказа. Например, система из 10 последовательных элементов в 10 раз уменьшит среднюю наработку до отказа, а вероятность безотказной работы системы за наработку $t=m_t$ уменьшится почти в 10^3 раз.

Для случая параллельного соединения N элементов с одинаковой интенсивностью отказов λ получим:

$$P_{H.C} = 1 - \prod_{i=1}^{N} \left(1 - P_{H.i}\right) = 1 - \prod_{i=1}^{N} \left(1 - e^{-\lambda t}\right) = 1 - \left(1 - e^{-\lambda t}\right)^N \qquad (12.43)$$

Из этого соотношения видно, что система параллельно соединенных элементов с экспоненциальными законами надежности не подчиняется экспоненциальному закону.

Средняя наработка до отказа такой системы определяется из соотношения:

$$m_{t.c} = m_t \sum_{k=1}^{N} \frac{1}{k}. \qquad (12.44)$$

Таблица 12.3. Зависимость средней наработки до отказа и вероятности безотказной работы системы от числа параллельных элементов

N	$m_{t.c}/m_t$	$P_{H.C}$ (P_H=0,9)
2	1,50	0,99
3	1,83	0,999
4	2,08	0,9999
10	2,88	$1\text{-}10^{-10}$
100	5,78	$1\text{-}10^{-100}$

Из соотношений (12.43) и (12.44) видно, что параллельное соединение элементов по надежности увеличивает вероятность безотказной работы системы и среднюю наработку до отказа. В табл.12.3 приведены значения увеличения средней наработки $m_{t.c}/m_t$ и вероятности безотказной работы системы в зависимости от числа элементов при вероятности безотказной работы одного элемента $P_{H.i}= e^{-\lambda t}=0,9$.

Из табл.12.3 видно, что применение в системе параллельных элементов по надежности позволяет очень сильно повысить вероятность безотказной работы системы, однако средняя наработка до отказа с увеличением числа элементов возрастает существенно медленнее. Использование параллельного подключения элементов по

надежности является одним из способов повышения показателей надежности сложных изделий резервированием.

Повышение надежности ЛА резервированием.

Как было отмечено в предыдущем разделе, любое техническое изделие с позиций надежности может быть разбито на элементы, соединенные последовательно, параллельно или смешанно. Например, топливный бак ракеты имеет сварные швы, соединяющие обечайку с верхним и нижним днищем. С позиций надежности топливный бак может быть представлен как последовательное соединение элементов, описывающих безотказную работу обечайки, верхнего и нижнего днища, всех сварных швов на баке, так как с отказом любого из этих элементов отказывает весь отсек. С другой стороны, хвостовой отсек состоит из обшивки и большого числа стрингеров. Стрингеры как элементы, обеспечивающие надежность отсека, можно считать соединенными параллельно, так как с разрушением одного стрингера нагрузка, действующая на отсек, с помощью торцевых шпангоутов перераспределяется на неотказавшие стрингеры, и весь отсек не теряет работоспособность. Однако отказавший стрингер не является лишним, потому что без него надежность отсека уменьшается. Если при сжатии отсека допускается образование волны (частичная потеря устойчивости), то стрингеры и обшивку можно считать соединенными параллельно, если образование волны недопустимо, то соединение - последовательное.

Конструктивные элементы могут быть зависимыми и независимыми. Примером зависимых элементов является пример со стрингерами, когда надо учитывать изменение надежности отсека при отказе одного из стрингеров. Если с определенным допуском такое изменение надежности можно не учитывать, тогда стрингеры можно считать независимыми элементами.

Как было отмечено при выводе соотношений (12.43) и (12.44), существует эффективный способ повышения надежности изделий за счет параллельного включения эквивалентных элементов. Такой способ связан с резервированием. Сущность резервирования заключается в том, что в системах предусматриваются избыточные (резервные) агрегаты, детали, узлы, блоки, вступающие в работу при появлении неисправностей основных рабочих элементов. В летательных аппаратах имеется много примеров резервирования. Например, в самолетах предусматривается установка двух подкачивающих насосов в топливных системах, двух заборников топлива из баков, резервное питание тормозной системы, аварийный выпуск шасси и щитков закрылков, аварийное управление стабилизатором и т.д. Примерами резервирования являются также статически неопределимые силовые элементы конструкций планера, ракеты или космического корабля. Большое число резервных элементов, агрегатов и блоков имеется в бортовом радио- и радиотехническом оборудовании ЛА.

Существует два метода резервирования - общее резервирование (резервируется вся система) и резервирование системы по элементам (рис.12.7). Сравним эти два метода с позиций повышения вероятности безотказной работы всей системы. Считая (для простоты анализа), что вероятность безотказной работы P_H всех элементов одинакова, и используя (12.43), получим для системы с общим и поэлементным резервированием соотношения:

$$P_{H,o}=1-(1-P_H^k)^n,$$
$$P_{H,э}=[1-(1-P_H)^n]^k.$$

Перейдя в этих соотношениях к вероятности отказа $F=1-P_H$ и воспользовавшись тем, что $(1-F)^r\cong 1-rF$ (при $F<<1$), получим для вероятности отказа при общем $F_{c,o}$ и поэлементном $F_{c,э}$ резервировании:

$$F_{c,o}=1-P_{H.0}\cong nkF,$$
$$F_{c,э}=1-P_{H,э}\cong kF^n. \qquad (12.45)$$

Полученные соотношения (12.45) показывают, что поэлементное резервирование по схеме рис.12.7 а дает выигрыш в увеличении вероятности безотказной работы. Например, при $F=0,1$ и $n=3$ получим $F_{c,э}/F_{c,o}=F^{n-1}/n\cong 3\cdot 10^{-4}$, что вероятность отказа снижается в $3\cdot 10^{-4}$ раза.

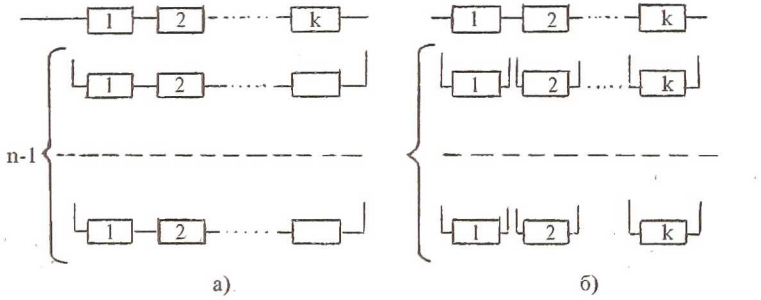


Рис.12.7. Схема резервирования системы:
а - общее резервирование, б - поэлеметное резервирование

Однако надо учитывать, что при поэлементном резервировании возникает существенно большее число дополнительных элементов, обеспечивающих включение каждого элемента в систему. Эти элементы подключения являются элементами системы по надежности, обладающими вероятностью безотказной работы $P_H\neq 1$, которую необходимо учитывать при расчете и которая, естественно, снизит полученный выигрыш.

Резервные элементы могут быть включены на все время эксплуатации в режиме основного элемента (нагруженный резерв), могут включаться после выхода из строя основных элементов (ненагружен-

ный резерв) или могут быть включены постоянно, но в менее нагруженном режиме, чем основной элемент (облегченный резерв). Особенность резервирования систем ЛА, например, гидравлических систем, систем управления стабилизатором и т.д. состоит в том, что в них, как правило, применяются системы и агрегаты с нагруженным резервом. Это объясняется условиями работы и тяжелыми последствиями, к которым ведет выход из строя этих систем. Системы с ненагруженным резервом не всегда обеспечивают условия непрерывной работы (на включение резервной системы требуется определенное время) и в процессе работы изделия возникает разрыв. Поэтому в большинстве случаев ненагруженный резерв применяется как аварийный, обычно действующий кратковременно.

В жизненно важных системах ЛА, отказ которых угрожает безопасности полетов, резервированию уделяют особое внимание. Целесообразно структуру управления резервных систем в этих случаях строить по методу "пересиливания" или "подавления" отказавшего агрегата. Этот метод более надежен по сравнению с методом использования специальных систем для определения отказа элемента, его отключения и включения резервного. Кроме того, например, при отказе основной и резервной систем управления стабилизатором их система управления обеспечивает перестановку стабилизатора в посадочное положение.

При общем резервировании с постоянно включенным резервом все системы работают на одну нагрузку. При отказе какой-либо одной системы нагрузка перераспределяется на оставшиеся системы. Это понижает вероятность безотказной работы не только потому, что уменьшается кратность резервирования, но также из-за увеличения нагрузки на каждую оставшуюся систему.

Анализ характеристик надежности при общем резервировании с постоянно включенным резервом показывает (12.43) и (12.44), что вероятность безотказной работы резервированной системы всегда больше вероятности безотказной работы нерезервированной и она растет с ростом кратности резервирования. Средняя наработка до отказа при этом растет существенно медленнее (табл.12.3). Вероятность безотказной работы при поэлементном резервировании при прочих равных условиях всегда выше вероятности безотказной работы системы с общим резервированием. Причем это отличие возрастает в случае уменьшения интенсивности отказов (12.45) (точнее в случае уменьшения λt). Следовательно, резервировать целесообразно мелкие узлы и детали сложной системы.

Резервирование позволяет из малонадежных элементов изготовить достаточно надежную систему. Однако при этом могут существенно увеличиться масса, габаритные размеры и стоимость изделия. Поэтому на практике решается задача оптимального проектирования обеспечение нужного уровня надежности резервированием

(часто поиск максимума вероятности безотказной работы) при ограничениях на массу, габаритные размеры и стоимость и т.д.

Роль влияния кратности резервирования на вероятность безотказной работы хорошо демонстрирует табл.12.3. Например, из трех одинаковых элементов с малым значением P_H=0,9 в течение некоторой наработки можно изготовить высоконадежную систему с P_H=0,999, повысив среднюю наработку на отказ в 1,83 раза.

Обоснование выбора показателей надежности технических изделий.

Выбор вида показателей надежности зависит от общего назначения изделия и ответственности выполняемых им функций.

Основным показателем безотказности любого технического изделия является вероятность безотказной работы P_H. Однако по мере эксплуатации изделия P_H убывает. Поэтому вероятность безотказной работы связана с основным параметром долговечности гамма-процентным ресурсом (п.12.2) функциональной зависимостью:

$P_H(T_\gamma)=\gamma/100$.

Следовательно, задаваясь допустимыми изменениями P_H в процессе эксплуатации, можно назначить T_γ, при достижении которого изделие попадает в предельное состояние. После капитального ремонта и восстановления P_H для изделия может быть назначено новое значение $T_{\gamma 1}$. При последующей эксплуатации P_H опять начинает снижаться и т.д. Обычно при каждом последующем ремонте число замененных узлов увеличивается $N_1<N_2<N_3<\ldots$.

Эксплуатация изделия с ремонтами продолжается до тех пор, пока восстановление уровня надежности станет или невозможным, или невыгодным.

Таким образом, возможны два варианта выбора показателей надежности.

Первый вариант. При высоких требованиях к надежности изделия задаются допустимые значения γ и по этому значению определяют гамма-процентный ресурс.

Второй вариант. При обычных требованиях к надежности, когда отказ изделия не приводит к катастрофическим последствиям и большим экономическим потерям, задается значением T_γ и по этому значению рассчитывают P_H. Исходя из полученного значения назначают сроки плановых ремонтов и технического обслуживания таким образом, чтобы P_H' в межремонтный период лежала в приемлемых пределах.

Однако и в первом, и во втором вариантах существуют предельные случаи, когда вероятность безотказной работы P_H перестает быть наглядным (табл.12.4).

Первый случай характерен для тех отказов, которые легко устранимы и не приводят к каким-либо значительным последствиям.

Таблица 12

Показатели безотказности изделия

Наличие отказа за $T=t$	Вероятность безотказной работы	Основной показатель безотказности
Как правило, имеют место	$P_H(t)\to 0$	ω - параметр потока отказов
Редкое событие	$0<P_H<1$	P_H - вероятность безотказной работы
Недопустимы	$P_H(t)\to 1$	n - коэффициент безопасности или запаса надежности

Например, замена режущего инструмента при работе на стан необходимость поправлять в транспортном лотке заклинивш детали и т.д. В этом случае характеристикой безотказности являет параметр потока отказов:

$$\omega(t)=\frac{d\Omega}{dt}\cong\frac{1}{T_{CP}},$$

где T_{CP} - наработка на отказ.

Другой крайний случай возникает при оценке высоконаде ных изделий, когда значение $P_H(t)$ близко к единице. Необходимо метить, что существуют ситуации, когда $P_H(t)=1$ при изменении течение некоторой наработки, например, если отказ определяется которым физическим процессом, скорость которого известна. Поэт му за счет избыточной надежности может быть реализована описа ная ситуация. В этих случаях расчет производится по коэффициент безопасности или коэффициентам запаса надежности. В теор надежности такой расчет обычно проводится как расчет вероятнос безотказной работы изделия по заданному параметру.

В связи с особой важностью этого вопроса рассмотрим е более подробно. Например, при расчетах на прочность, жесткос износостойкость, теплостойкость, усталость, точность изготовлени т.д. проводится сопоставление по некоторым критериям расчетн параметров с их предельными значениями.

Считают, что работоспособность по данному критер обеспечена, если расчетный параметр критерия x меньше (или боль заданного предельного значения x_n. Учитывая требован надежности, в такой расчет вводят коэффициент безопасности принимая расчетное условие в виде:

$$x\le x_n/n \text{ (или } x\ge x_n/n) . \qquad (12.46$$

В этом случае x и x_n считают детерминированными величи ми, хотя в действительности эти параметры являются статистичес ми и имеют определенное рассеяние. Для учета такого рассеян

расчет ведется по наиболее неблагоприятным значениям. Поэтому, хотя надежность и завышается по одному из критериев в ущерб другим, истинное значение показателя надежности неизвестно. Теория надежности позволяет корректно ответить на все возникающие в этой ситуации вопросы.

Пусть задан некоторый параметр x, являющийся случайной величиной с плотностью распределения $f_x(x)$, и односторонний допуск x_n на этот параметр, также являющийся случайной величиной с плотностью распределения $f_n(x_n)$. Требуется определить вероятность выполнения задания по параметру x, т.е. вероятность того, что случайная величина $L=X-X_n\geq 0$.

Эта задача фактически была нами уже решена и представлена формулами (12.37) и (12.38). Так, в случае, когда x и x_n независимы, плотность распределения случайной величины L будет определяться соотношением:

$$f_L(l)=\int_{-\infty}^{\infty} f_x(x)\,f_1(x-l)dx=\int_{-\infty}^{\infty} f_1(x_n-l)\,f_x(x_n)dx_n\ , \qquad (12.47)$$

а вероятность выполнения задания

$$P_H(L\geq 0)=\int_0^{\infty} f_L(l)dl\ , \qquad (12.48)$$

где, как обычно, детерминированная переменная l описывает область реализации случайной величины L.

Пусть параметры x и x_n имеют нормальные законы распределения с числовыми характеристиками m_x, σ_x и m_n, σ_n. Используя устойчивость нормального закона к линейному преобразованию, получим:

$$f_L(l)=\frac{1}{\sigma_l\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{l-m_l}{\sigma_l}\right)^2\right\}\ , \qquad (12.49)$$

$$P_H(L\geq 0)=0{,}5-\Phi\left(U_P\left(-\frac{m_l}{\sigma_l}\right)\right), \qquad (12.50)$$

где $m_l=m_x-m_n$, $\sigma_l^2=\sigma_x^2+\sigma_n^2$, $U_p=-m_l/\sigma_l$ квантиль нормального распределения.

Преобразуем выражение для квантиля, введя коэффициент запаса надежности $n=m_x/m_n$ и коэффициент вариации $\nu_x=\sigma_x/m_x$ и $\nu_n=\sigma_n/m_n$. Проведя необходимые преобразования, получим:

$$U_p=-\frac{m_l}{\sigma_l}=-\frac{n-1}{\sqrt{(\nu_n\cdot n)^2+\nu_x^2}}\ , \qquad (12.51)$$

$$P_H(L\geq 0)=0{,}5-\Phi(U_p) \qquad (12.52)$$

Из соотношений (12.51) и (12.52) видно, что вероятность выполнения задания по параметру зависит как от коэффициента запаса надежности, так и коэффициентов вариации параметра x и его предельного значения x_n.

Прежде чем мы перейдем к дальнейшему анализу (12.51) и (12.51), рассмотрим численный пример. Пусть x несущая способность детали, распределенная по нормальному закону с параметрами m_x=3 kH и σ_x=0,7 kH, а x_n действующая нагрузка, распределенная также по нормальному закону с параметрами m_n=2 kH и σ_n=0,5 kH.

Коэффициент запаса надежности будет m_x/m_n=1,5 и, казалось бы, можно утверждать, что от этой нагрузки деталь не разрушится. Однако, расчет дает: U_p= -1,16; Φ(-1,16)=-0,38 и $P_H(L\geq 0)$=0,88.

Следовательно, мы получили, что хотя коэффициент запаса надежности выбран 1,5, тем не менее из каждых 100 деталей следует ожидать разрушение в 12 случаях.

Такое низкое значение вероятности безотказной работы по параметру (вероятности выполнения задания) определяется наличием дисперсии (точнее значением коэффициентов вариации) в распределениях как параметра, так и допуска на него. Для примера на рис.12.8 приведено распределение $f_L(l)$ по соотношению (12.49) для двух случаев с различными значениями $\sigma_{l,1}<\sigma_{l,2}$ и одинаковыми значениями m_l. Заштрихованная площадь по кривой плотности распределения левее точек l=0 равна вероятности невыполнения задания $1-P_H$. Из рисунка видно, что даже в случае одинаковых коэффициентов запаса надежности можно получить различные вероятности выполнения задания в зависимости от рассеяния (дисперсии) случайной величины.

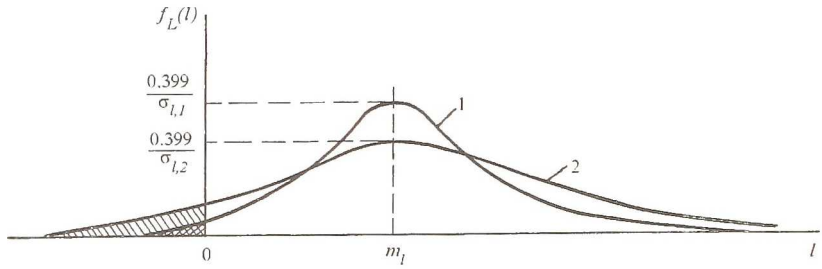


Рис.12.8. Влияние дисперсии σ_l на вероятность выполнения задания ($x=x-x_n\geq 0$)

Дисперсия σ_l зависит от дисперсии σ_x и σ_n. Если x_n, как в рассмотренном примере, характеризует внешнюю нагрузку на некоторую деталь, то σ_n определяется стабильностью и диапазоном изменения внешних нагрузок на все изделие, стабильностью работы агрегатов изделия (скорости вращения, диапазоны вибраций,

диапазоны температур и т.д.) и качеством сборки изделия (разброс натягов, вибрации и т.д.).

В этом же примере несущая способность детали x дает дисперсию σ_x, которая зависит от стабильности и однородности технологического процесса получения материала заготовки, стабильности качества и геометрии получения детали, стабильности обеспечения качества при сборке изделия.

Математические ожидания в этом же примере соответствуют m_x - прочностным возможностям материалов после изготовления детали (предел текучести, предел прочности, предел выносливости и т.д. данного сечения детали), m_n средним значением нагрузок на деталь в данном сечении.

Таким образом, простейший анализ вероятности выполнения задания по некоторому параметру позволяет включить в анализ обеспечения надежности изделия количественно производственный фактор не только через обеспечение средних значений параметров качества, но и необходимость обеспечения высокой стабильности производства. Причем, за счет повышения стабильности производства возникают возможности не менее эффективного влияния на надежность изделия, чем за счет повышения средних значений свойств деталей.

Следовательно, хотя основным параметром безотказности при $P_H(t) \to 1$ (табл.12.4) по общепринятой терминологии является коэффициент запаса надежности, авторы считают, что в таких расчетах неоправдано забывается роль коэффициентов вариации, снижение которых может быть эффективным направлением повышения надежности изделий.

12.4.Организация испытаний и контроля. Оценка показателей надежности по результатам испытаний

В общем комплексе мероприятий по обеспечению надежности экспериментальные оценки играют важную роль, так как позволяют оценить достигнутые значения показателей надежности и обосновать необходимые мероприятия по повышению этих показателей. Результаты экспериментальной оценки показателей надежности типовых узлов и элементов служат исходными данными при априорных оценках надежности вновь разрабатываемых изделий.

Испытания это экспериментальное определение характеристик изделий, проводимое по специально разработанному плану. Испытания могут быть специальные или совмещенные. В совмещенных испытаниях определение или контроль показателей совмещается с экспериментальными исследованиями других параметров изделий. В специальных испытаниях обычно заранее планируется их объем, а

условия испытаний устанавливаются исходя из требований конкретного показателя надежности. Такие испытания, как правило, организуются для изделий, выпускаемых в достаточно большом количестве, либо для особо ответственных изделий. Часто проводить специальные испытания для сложных изделий и систем не представляется возможным, так как объем выпуска обычно ограничен единицами экземпляров, а процесс изготовления, отладки, проверки функционирования и доводки занимает слишком много времени. Показатели надежности таких изделий оценивают в основном по результатам либо совмещенных испытаний, либо наблюдений на этапе эксплуатации.

Экспериментальная оценка показателей надежности требует значительного времени, большого числа образцов, необходимости испытания до разрушения и больших материальных затрат.

В связи с этим разрабатываются специальные методы ускорения испытаний как за счет уменьшения времени испытаний, так и за счет уменьшения числа испытываемых изделий.

Ускоренными испытаниями называют любые испытания, при которых используются те или иные методы сокращения объема испытаний.

Объем испытаний сокращают путем:

- форсирования режимов испытания (форсированные испытания);
- оценки надежности по малому числу отказов или вообще отсутствию отказов;
- сокращения числа испытываемых образцов за счет увеличения длительности испытаний.

Экспериментальные оценки надежности преследуют одну из следующих целей:

- определение фактического значения показателей надежности;
- контроль соответствия изготовленного изделия требованиям по надежности, заложенным в технических условиях на изделие.

В связи с этим в испытаниях на надежность выделяют определительную и контрольную процедуры. Эти процедуры имеют существенные отличия.

При планировании определительной процедуры принципиально невозможно однозначно указать необходимый объем испытаний, так как точность оценок показателей надежности при заданной достоверности зависит не только от объема испытаний, а в большей степени от объема получаемой информации. Исходя из требуемых точности и достоверности оценок, в результате планирования определительной процедуры получают не объем испытаний, а минимально необходимое число информативных реализаций.

Требуемый объем испытаний (число изделий, число опытов, продолжительность испытаний) зависят от фактической надежности изделия, которая до испытания неизвестна. Поэтому при

планировании объем испытаний определяется ориентировочно и в процессе испытаний корректируется.

Планирование контрольной процедуры опирается на требуемое значение показателя надежности, записанное в ТУ по результатам определительных испытаний. В результате планирования определяется необходимый минимальный объем испытаний и оценочный норматив, по которому принимается решение о соответствии или несоответствии изделия заданным требованиям. Поэтому в контрольной процедуре корректность планирования непосредственно определяет достоверность принятого решения о принятии или браковке изделия или всей партии.

Характер статистической информации при испытаниях. Стратегии испытаний и диаграммы их реализаций.

Результаты испытаний, очищенные предварительной обработкой, подлежат статистической обработке, т.е. оценке параметров функций распределения случайных величин, определяющих искомые показатели надежности.

При экспериментальной оценке показателей надежности многие задачи независимо от конкретного содержания имеют одинаковый алгоритм решения, а все многообразие оцениваемых показателей сводится к показателям двух типов:

- показатели типа наработки - средняя или гамма-процентная (наработка до отказа, между отказами, до предельного состояния, срок сохраняемости, время восстановления и т.д.);
- показатели типа вероятности (безотказной работы, исправного состояния в произвольный момент, восстановления за заданное время и т.д.).

При определении показателей типа наработки непосредственно наблюдаемыми величинами являются случайные интервалы времени.

При определении показателей типа вероятности непосредственно наблюдаемыми величинами являются числа событий в испытаниях - число отказов, число восстановлений и т.д.

Все виды испытаний проводятся в соответствии со стратегией испытания, которая должна содержать информацию о следующих факторах.

1. Числе изделий, подвергаемых испытаниям.
2. Порядке контроля функционирования.
3. Порядке восстановления изделия.
4. Порядке поступления изделия на испытания.
5. Критерии окончания испытаний.

Условные обозначения основных факторов испытания приведены в табл.12.5.

Таблица 12.5.

Факторы, характеризующие стратегию испытаний, и их условные обозначения

Факторы, характеризующие стратегию		Условное обозначение
Число испытываемых изделий	Одно	1
	Более одного	N
Возможность восстановления изделия при испытаниях	Не восстанавливается и не заменяется	U
	Не восстанавливается, но заменяется	R
	Восстанавливается	M
Критерий прекращения испытаний	Наработка	T
	Число отказов	r
	Наработка или число отказов	r, T
Порядок поступления изделий на испытания	Одновременно	[ ]
	Неодновременно	( )
Режим контроля функционирования изделия при испытаниях	Непрерывно	[ ] или ( )
	Периодически	[[ ]] или (( ))
	Только перед началом и по окончании	{ }

В этих обозначениях конкретная стратегия испытаний (называют также планом испытаний) записывается сочетанием трех соответствующих символов, соответствующих числу объектов наблюдения, порядку проведения наблюдений и критерию их прекращения. Например, [NUT] - изделия в количестве N поставлены одновременно на испытания, контроль непрерывный, отказавшие изделия не восстанавливаются и не заменяются, испытания прекращаются после достижения наработки, равной T.

При испытаниях возможны только три типа реализаций.

1. Наработка до отказа, получившая название полная реализация и обозначаемая графически ×.
2. Безотказная наработка, получившая название неполная реализация и обозначаемая графически •.
3. Наработка к моменту контроля, при которой обнаружен отказ (в случае отсутствия непрерывного контроля), получившая название условная реализация и обозначаемая графически |.

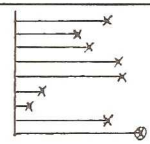
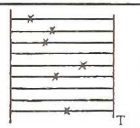
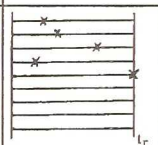
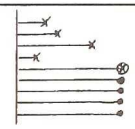
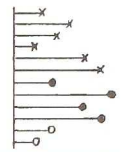
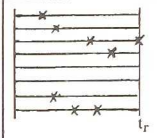
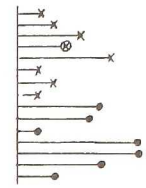
Если испытания ведутся до фиксированного числа отказов, то отказ, совпадающий с моментом окончания испытаний, отличается дополнительным кружком. Например, соответствующая полная реализация графически обозначается ⊗.

В этих обозначениях результат любого испытания на надежность может быть представлен графически соответствующим набором реализаций - диаграммой реализации.

Диаграммы реализаций для наблюдений с непрерывным контролем представлены в табл.12.6. В частности, при стратегии [*NUN*] результаты испытаний содержат только полные реализации, причем момент последнего отказа является моментом окончания испытаний. Получаемая при этом выборка (тип 1А) является примером экспериментальных данных классического типа - "полная выборка".

Таблица 12.6.

Типы экспериментальных данных при непрерывных испытаниях

Стратегия испытаний	Схема процесса испытаний	Диаграмма реализаций	Условное обозначение диаграммы	Стратегии с аналогичными диаграммами
[*NUN*]			1А	[*1Mr*] [*1Rr*] (*NUN*)
[*NUT*]			1Б	(*NUT*)
[*NUr*]			1В	---
[*NRT*]			1Г	[*NMT*] (*NMT*) (*NRT*)
[*NRr*]			1Д	[*NMr*] [*NMr*] (*NRr*) (*NUr*)

При стратегии [*NUT*] если, например, N_1 изделий отказали, то результат испытаний содержит N_1 полных реализаций, значения которых не превышают длительности испытаний T и N-N_1

одинаковых неполных реализаций (выборка тип 1Б). Такой же характер имеет выборка типа 1В, с той лишь разницей, что в этом случае момент окончания испытаний совпадает с моментом последнего отказа. Выборки типов 1Б и 1В являются примерами так называемой усеченной выборки.

Аналогично могут быть представлены диаграммы реализаций при периодическом контроле функционирования.

Нами были рассмотрены экспериментальные данные, получаемые при испытаниях на безотказность. Эти испытания и испытания при исследовании показателей долговечности отличаются наибольшим разнообразием. При оценке показателей ремонтопригодности приходится иметь дело, как правило, с выборкой типа 1А, а при исследовании показателей сохраняемости приходится иметь дело с периодическим контролем.

Методы определения точечных и интервальных оценок показателей надежности.

Для нахождения законов распределения случайных величин необходимо обладать достаточно большим статистическим материалом, т.е. провести большой объем испытаний. На практике всегда приходится иметь дело с ограниченным статистическим материалом. Такого ограниченного материала явно недостаточно, чтобы найти заранее неизвестный закон распределения, но этот материал может быть использован для оценки важнейших численных характеристик распределения математического ожидания, дисперсии и т.д. На практике нередко бывает, что вид закона распределения известен заранее, а требуется найти только параметры распределения и надежности. В некоторых задачах закон распределения может быть вообще несущественен, а требуется найти только числовые характеристики.

Оценки параметров распределения могут быть точечными и интервальными.

Рассмотрим нахождение точечных оценок. Если мы проведем n испытаний случайной величины X, то мы получим выборку, которая также будет случайной $X_1 \ldots X_n$. Эту выборку можно рассматривать как n случайных величин, каждая из которых имеет тот же закон распределения, что и случайная величина X. Пусть нам надо определить некоторый параметр a, связанный с законом распределения X. Так как величина a будет вычисляться на основе использования случайных величин, то величина a также будет случайной, а её любое вычисленное значение носит название оценки, которую будем обозначать $\hat{a}$, т.е.

$$\hat{a} = \varphi(x_1, \ldots, x_n).$$

Закон распределения $\hat{a}$ зависит от законов распределения x_i, вида функции φ (п.12.3) и числа опытов n.

К такой точечной оценке предъявляется ряд требований.

1. Оценка должна быть состоятельной, т.е. при увеличении числа опытов n необходимо, чтобы $\hat{a} \to a$.
2. Оценка должна быть несмещенной, чтобы не возникала систематическая погрешность. Для этого необходимо выполнение условия
   $M[\hat{a}]=a$.
3. Оценка должна быть эффективной, т.е. по сравнению со всеми другими оценками должна обладать минимальной дисперсией.

Для нахождения точечных оценок используются аналитические методы: метод максимального правдоподобия, метод моментов, метод квантилей и др. Кроме того используются графические методы с использованием вероятностных бумаг и номограмм. Особенности применения этих методов к различным планам испытаний приведены в пособиях по теории вероятности и надежности. Отметим, что для выборки типа 1А (см. табл.12.6) оценкой математического ожидания является среднее значение:

$$\hat{m}_x = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \ , \qquad (12.53)$$

а оценкой дисперсии является величина:

$$d_x = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \hat{m}_x\right)^2 \ . \qquad (12.54)$$

Необходимо подчеркнуть, что для других типов наблюдений оценки могут иметь другие расчетные соотношения. Например, для плана $[NUT]$ с k полными реализациями и n-k неполными оценка математическое ожидание имеет вид:

$$\hat{m}_x = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} x_i + \frac{n-k}{k}T \qquad (12.55)$$

Любая точечная оценка обладает существенным недостатком в том смысле, что она сама представляет лишь частное значение случайной величины. Мы не имеем представления о степени доверия к этой оценке (степени её точности). Недостаток точечной оценки хорошо виден на следующем примере.

Пусть проведено два независимых испытания одних и тех же изделий. Распределение наработки на отказ экспоненциальное, число изделий в первом и втором случае одинаково: n=500 шт. Продолжительность первого испытания T_1=100 ч, а второго T_2=200 ч. При этом числа отказов соответственно n_1=5 и n_2=10.

Точечные оценки интенсивности отказов получатся одинаковыми $\hat{\lambda}_1 = \hat{\lambda}_2 = 10^{-4}$ ч$^{-1}$. Однако индуктивно ясно, что во втором случае оценка более достоверна. Если бы при испытаниях число отказов было n_1=0, то $\hat{\lambda}_1 = 1/T$, где T - длительность испытания.

Поэтому кроме точечной оценки желательно знать интервал оценок, который с достаточно высокой вероятностью накрывает оцениваемый параметр. Очевидно, что абсолютно достоверными интервалами для наработки T будет интервал $[0, \infty)$, а для вероятности отказа или вероятности безотказной работы $[0,1]$.

Указание других границ сопряжено с риском совершить ошибку. Вероятности ошибок ε_1 и ε_2 называют уровнями значимости оценок. ε_1 - вероятность того, что найденный интервал не накроет параметр своим левым концом, а ε_2 - своим правым концом.

В качестве меры достоверности оценки (доверительной вероятности) принимается величина $\gamma^*=1-\varepsilon_1-\varepsilon_2$, показывающая, с какой вероятностью можно утверждать, что доверительный интервал покрывает истинное значение параметра:

$$\gamma^*=P(T_H<T<T_B)\,, \qquad (12.56)$$

где T_H и T_B нижняя и верхняя границы доверительного интервала, соответственно (рис.12.9).

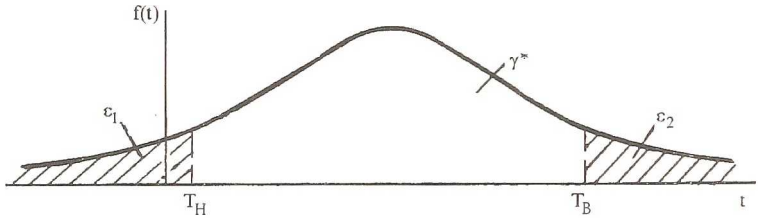


Рис.12.9. Двухсторонний доверительный интервал $[T_H, T_B]$ и доверительная вероятность γ^*. ε_1, ε_2 - уровни значимости оценок нижней и верхней границ соответственно

Итак, доверительный интервал это случайная величина, длина и положение его зависит от результатов испытаний. При фиксированной длине доверительного интервала доверие к нему (доверительная вероятность) будет возрастать только при увеличении объема выборки. При фиксированном объеме выборки невозможно повысить доверительную вероятность, не увеличивая границы интервала и наоборот (12.56).

Обычно ε_1 и ε_2 выбирают одинаковыми, поэтому $\gamma^*=1-2\varepsilon$ и, следовательно, каждая из доверительных границ выбирается с уровнем значимости $\varepsilon=(1-\gamma^*)/2$ или с односторонней доверительной вероятностью $\gamma=1-\varepsilon$.

Если известен вид функции распределения, то границы доверительного интервала вычисляются через соответствующие квантили.

1. Двухсторонний доверительный интервал $[\varphi_H(x), \varphi_B(x)]$ для оценки параметра $a=\varphi(x)$ определяется из уравнения

$$P(\varphi_H(x)\le\varphi\le\varphi_B(x))=\alpha\,. \qquad (12.57)$$

2. Верхний $(-\infty, \varphi_B(x)]$ и нижний $[\varphi_H(x), \infty)$ односторонние интервалы для оценки параметра $a=\varphi(x)$ определяются из уравнений

$$P(\varphi<\varphi_B(x))=1-\varepsilon\,, \quad P(\varphi_H(x)<\varphi)=\varepsilon\,. \tag{12.58}$$

Вид распределения оценки определяется, в свою очередь, видом распределения исследуемой случайной величины x и теми функциональными преобразованиями, которые производятся над x для получения $a=\varphi(x)$.

Например, если оценка математического ожидания дается выражением $\hat{m}_x = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{k} x_i$, то распределение $\hat{m}_x$ есть распределение суммы n независимых случайных величин, которое целиком определяется распределением случайной величины x и числом полных реализаций n. В частности, если слагаемое x_i имеет экспоненциальное распределение, то $\hat{m}_x$ имеет χ^2-распределение с числом степеней свободы $2n$. Если x_i независимые нормально распределенные случайные величины с математическим ожиданием m_x и известной дисперсией σ^2, то оценка $\hat{m}_x$ имеет нормальное распределение с математическим ожиданием m_x и дисперсией σ^2/n, если же величина дисперсии неизвестна и оценивается на основе среднеквадратичного отклонения, то распределение $\hat{m}_x$ будет распределением Стьюдента с числом степеней свободы n-1.

Рассмотрим некоторые типичные ситуации, возникающие в теории надежности ЛА при определении границ доверительных интервалов оцениваемых параметров.

Наработка до отказа многих технических изделий подчиняется экспоненциальному закону. Проводится испытание изделия по одному из планов (см. табл.12.6) и получено n полных реализаций значений наработки до отказа $\{T_1 \ldots T_n\}$. Требуется оценить параметры распределения.

Экспоненциальный закон надежности описывается одним параметром - интенсивностью отказа.

Поэтому точечную оценку распределения удобнее проводить относительно средней наработки до отказа. С помощью метода максимального правдоподобия или метода моментов можно показать, что точечная оценка m определяется соотношением:

$$\hat{m}_t = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} T_i \tag{12.59}$$

Для определения точности полученной оценки необходимо оценить границы доверительного интервала этой величины. В теории вероятности доказывается, что если T подчинено экспоненциальному закону, то m_t имеет χ^2-распределение. Используя определение

квантиля (п.12.3) и (12.58), получаем, что для планов испытания: 1А, 1В и 1Д нижняя и верхняя границы доверительного интервала для уровня значимости оценки ε равны:

$$T_H = \frac{2t_\Sigma}{\chi^2_{1-\varepsilon,2n}}, \quad T_B = \frac{2t_\Sigma}{\chi^2_{\varepsilon,2n}}. \tag{12.60}$$

В случае плана 1Г получим:

$$T_H = \frac{2t_\Sigma}{\chi^2_{1-\varepsilon,2(n+1)}}, \quad T_B = \frac{2t_\Sigma}{\chi^2_{\varepsilon,2n}}, \tag{12.61}$$

где t_Σ - суммарная наработка изделий при испытаниях; n число отказов (полных реализаций).

Таким образом, оценка m_t (12.59) лежит в интервале $\hat{m}_t \in [T_H, T_B]$ (12.60), (12.61) с уровнем значимости ε или с доверительной вероятностью $\gamma^*=1-2\varepsilon$.

Если в результате испытаний число отказов $n=0$ (частный случай выборки 1Г), то T_B неограничена и определяется только нижняя доверительная граница:

$$T_H = \frac{2t_\Sigma}{\chi^2_{1-\varepsilon,2}}. \tag{12.62}$$

Следовательно, в этом случае оценка m_t (12.59) дает значение средней наработки до отказа не менее $T_H < \hat{m}_t$, (12.62) при уровне значимости или доверительной вероятности $\gamma=1-\varepsilon$.

Если при тех же испытаниях случайная величина T подчинена нормальному закону, то оцениваются два параметра средняя наработка на отказ и дисперсия. Точечная оценка этих величин дается соотношениями:

$$\hat{m}_t = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} T_i, \quad \hat{D} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(T_i - \hat{T}\right)^2. \tag{12.63}$$

При этом $\hat{m}_t$ имеет распределение Стьюдента, а $\hat{D}$ имеет распределение $\sigma 2$. Используя определение квантиля и (12.58), получаем для верхней и нижней границ доверительного интервала оценки m_t с доверительной вероятностью γ значения:

$$T_B = \hat{T} + t_{\gamma,n-1}\sqrt{\frac{\hat{D}}{n-1}}, \quad T_H = \hat{T} - t_{\gamma,n-1}\sqrt{\frac{\hat{D}}{n-1}}, \tag{12.64}$$

где $t_{\gamma,n-1}$ - квантиль распределения Стьюдента.

При испытаниях по планам $[NUT]$ и $\{NUT\}$ мы располагаем только сведениями о числе изделий N, подвергнутых испытаниям, и числе изделий n, отказавших за время испытаний T. При этом единственным показателем, который может быть оценен, является

вероятность отказа q за время испытаний. Если в качестве случайной величины рассматривать число отказов n и считать, что появление отказов равновероятно при проведении однотипных независимых испытаний (q=const), то вероятность возникновения n отказов определяется формулой Бернулли:

$$P(x=n)=C_N^n q^n (1-q)^{N-n}. \qquad (12.65)$$

Эта функция распределения числа отказов подчиняется биноминальному распределению (табл.12.2):

$$F(n) = P(x \le n) = \sum_{i=1}^{n} P(x=i) = \sum_{i=1}^{n} C_N^i q^i (1-q)^{N-i}. \qquad (12.66)$$

При таких испытаниях оценивается один параметр q. Метод максимального правдоподобия дает оценку:

$$\hat{q} = n/N \qquad (12.67)$$

Используя (12.58), получаем, что верхняя и нижняя границы доверительного интервала по уровню значимости ε определяются как квантили из решения уравнений:

$$\sum_{i=0}^{n} C_N^i q_B^i (1-q_B)^{N-i} = \varepsilon, \quad \sum_{i=n}^{N} C_N^i q_H^i (1-q_H)^{N-i} = \varepsilon. \qquad (12.68)$$

В случае проведения безотказных испытаний по этой схеме n=0 и из (12.68) может быть определены верхняя граница вероятности возникновения отказа:

$$(1-q_B)^N=\varepsilon \text{ или } q_B = 1-\sqrt[N]{\varepsilon}. \qquad (12.69)$$

Используя определения вероятности безотказной работы (P_H=1-q_B) и вводя доверительную вероятность γ=1-ε, получим для нижней границы вероятности безотказной работы при безотказных испытаниях соотношение:

$$P_{H,H} = \sqrt[N]{1-\gamma}. \qquad (12.70)$$

Эта формула находит широкое применение на практике при подтверждении работоспособности высоконадежных систем, так как в этом случае испытания, как правило, безотказные. Результаты расчета по (12.70) показывают, что для подтверждения высоких уровней надежности требуется очень большое число испытаний. Ниже представлены объемы безотказных испытаний N, которые с доверительной вероятностью γ = 0,9 позволяют подтвердить соответствующие им значения нижней границы $P_{H,H}$ вероятности безотказной работы

N	10	100	1000	10000
$P_{H,H}$	0,795	0,977	0,998	0,9998

Очевидно, проведение такого числа испытаний при производстве летательных аппаратов не представляется возможным. Объем испытаний, как

правило, предопределен возможностями технологической базы, стоимостью и сроками отработки. В связи с этим возникает задача определения и подтверждения высоких уровней надежности при малом числе испытаний.

Ускоренные испытания.

Как было отмечено в предыдущем разделе, для подтверждения высоких уровней надежности летательных аппаратов требуется большое число испытываемых изделий, что приводит к большим экономическим затратам и сдерживает ввод изделий в эксплуатацию.

В связи с этим в теории надежности разработан ряд подходов по ускорению испытаний. В общем случае ускорение проводится за счет сокращения числа испытываемых изделий. Сокращение числа испытываемых изделий может достигаться за счет: привлечения дополнительной информации о законах распределения отказов; форсирования режимов испытания; проведения безотказных испытаний; испытаний с малым числом отказов; увеличения длительности испытаний.

Рассмотрим основные из этих методов. При получении соотношений (12.68) и (12.69) использовался минимальный статистический объем информации о техническом объекте типа "да-нет" (работоспособен-неработоспособен) и этот недостаток информации приходится компенсировать увеличением числа самих испытаний. Однако, знание модели функционирования технического объекта позволяет существенно уменьшить объем испытаний.

Работоспособность изделия определяется вероятностью выполнения задания по некоторому выходному параметру. Пусть известно, что распределение параметра подчинено нормальному закону. Тогда используя (12.49), получим:

$$P_H = P(z \geq 0) = P_H\left(\frac{z - m_z}{\sigma_z}\right)_{z=0} = 0{,}5 - \Phi\left(U_p\right) . \qquad (12.71)$$

Таким образом, для нахождения точечной оценки вероятности безотказной работы необходимо из результатов испытаний найти значения квантиля:

$$\hat{U}_p = -\hat{m}_z / \hat{\sigma}_z . \qquad (12.72)$$

Выражение для квантиля определяется через точечные оценки математического ожидания и дисперсии

$$\hat{m}_z = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} z_i, \quad \hat{\sigma}_z^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(z_i - \hat{m}_i\right)$$

В связи с тем, что оценки $\hat{m}_z$ и $\hat{\sigma}_z$, а следовательно, и $\hat{U}_p$ являются случайными величинами, оценка $P_H\left(\hat{U}_p\right) = \hat{P}_H$ также будет случайной. Для получения гарантированного результата необходимо получить интервальную оценку $\hat{P}_H$. Ввиду монотонности функции

(12.69) по U_p для нахождения границ $P_{H,H}$ и $P_{H,B}$ достаточно получить соответствующие границы для $\hat{U}_p$. Используя результаты (12.63) и (12.64), получим:

$$U_{p,H}=\frac{m_{z,H}}{\hat{\sigma}_z}=\hat{U}_p-\frac{1}{\sqrt{n-1}}t_{\gamma,n-1},\quad U_{p,B}=\frac{m_{z,B}}{\hat{\sigma}_z}=\hat{U}_p+\frac{1}{\sqrt{n-1}}t_{\gamma,n-1}. \quad (12.73)$$

Откуда получим из (12.71):

$$P_{H,H}=0{,}5-\Phi(U_{p,H}),\quad P_{H,B}=0{,}5-\Phi(U_{p,B})\,. \quad (12.74)$$

Рассмотрим численный пример. Пусть проведено n=9 испытаний, в результате обработки которых было получено по (12.72) $\hat{U}_p$=-3. Откуда нижняя граница вероятности безотказной работы $P_{H,H}$ с доверительной вероятностью γ = 0,95 ($t_{\gamma,n-1}$= 1,86) будет определяться через квантиль (12.73)

$$U_{p,H}=-3-\frac{1{,}86}{\sqrt{8}}=-3{,}66\,.$$

Следовательно, $P_{H,H}(-3{,}66)=0{,}9998$.

Таким образом, в девяти испытаниях было получено, что с доверительной вероятностью γ=0,95 вероятность безотказной работы изделия не менее $P_{H,H}$= 0,9998. Отметим, что для подтверждения такого уровня надежности по схеме "да-нет" (12.70) было бы необходимо провести безотказные испытания в объеме

$$N=\frac{\lg(1-\gamma)}{\lg P_{H.H}}\cong 1{,}5\cdot 10^4\,.$$

Таким образом, значение модели функционирования изделия (нормальный закон) позволило во много раз уменьшить объем испытаний.

При проведении форсированных испытаний изделие испытывается при более жестких режимах функционирования, чем штатные. По результатам форсированных испытаний производится оценка надежности изделий в этих условиях, а затем соответствующим образом перерассчитывается на штатный режим функционирования.

Использование форсированных испытаний требует знания взаимосвязи между исследуемым параметром испытаний. В общем случае установление такой зависимости требует больших предварительных исследований. Однако знание функций распределения позволяет и в этом случае существенно упростить задачу.

Рассмотрим так же, как и в предыдущем случае, вероятность безотказной работы как вероятность выполнения задания по некоторому параметру (12.71). Запишем в явном виде квантиль нормального распределения через числовые характеристики распределений параметра x и его предельного значения x_n (12.51):

$$U_p = -\frac{k-1}{\sqrt{k^2 \nu_n^2 + \nu^2}}, \qquad (12.75)$$

где $k=m_n/m_x$ коэффициент запаса надежности; $\nu_n=\sigma_n/m_n$ и $\nu=\sigma_x/m_x$ коэффициенты вариации параметра и его предельного значения (см.пояснения к (12.51)).

Будем считать для простоты, что коэффициенты вариации при форсированных испытаниях не изменяются (при их изменении они рассчитываются по ранее описанным методикам). Следовательно, для расчета надежности изделия требуется знание одного параметра k коэффициента запаса надежности. При проведении форсированных испытаний коэффициент запаса надежности k_ϕ уменьшается. Будем считать, что коэффициенты запаса надежности при штатном и форсированном функционировании связаны коэффициентом форсирования η_ϕ:

$$k_\phi = k/\eta_\phi . \qquad (12.76)$$

Коэффициент форсирования испытаний должен задаваться исходя из анализа работоспособности изделия. Например, для пирозамка прочность корпуса определяется внутренним давлением p_∂, создаваемым в рабочей полости при срабатывании пиропатрона, и несущей способностью корпуса, определяющей предельное разрушающее давление p_n. Поэтому коэффициент запаса надежности по прочности пирозамка будет $k=p_n/p_\partial$. Форсирование испытаний можно провести в этом случае увеличением действующего давления путем постановки более мощных пиропатронов или постановкой дополнительного пиропатрона той же мощности. В последнем случае можно считать, что $\eta_\phi=2$.

Предположим, что нам известны результаты форсированных испытаний: N общее число испытаний; n число отказов. Тогда по (12.68) и по значению доверительной вероятности γ определяем нижнюю границу $P^{\phi}_{H,H}$ вероятности безотказной работы при форсированных испытаниях, а по $P^{\phi}_{H,H}$ и таблицам нормальных распределений определяем соответствующий квантиль:

$$U^{\phi}_{p,H} = -\frac{k_\phi - 1}{\sqrt{k_\phi^2 \nu_n^2 + \nu^2}} . \qquad (12.77)$$

Из выражения (12.77) находим k_ϕ и далее по (12.76) определяем k:

$$k = \eta_\phi k_\phi . \qquad (12.78)$$

Используя это значение k и (12.75), по (12.71) определяем $P_{H,H}$ - нижнюю границу вероятности безотказной работы в штатном режиме:

$$P_{H.H}=0,5-\Phi(U_{p.H}) . \qquad (12.79)$$

Рассмотрим численный пример. Допустим, для рассматриваемого изделия коэффициенты вариации $\nu=\nu_n=0,05$. Испытания проводятся с $\eta_\phi=2$. Пусть при $N=10$ испытаниях произошел один отказ $n=1$. Задаваясь $\gamma=0,95$, найдем $P^{\phi}_{H.H}=0,401$. Определяя значение квантиля при нормальном распределении, получим $U^{\phi}_{p.H}=0,25$, откуда

$$k_\phi=1-0,25\sqrt{k_\phi^2\cdot(0,05)^2+(0,05)^2} .$$

Решая это квадратное уравнение относительно k_ϕ, получим $k_\phi=0,98$. Следовательно, $k=\eta_\phi k_\phi=1,96$ и $U_{p.H}=-8,75$. Поэтому по (12.79) найдем

$$P_{H.H}=0,5-\Phi(U_{p.H})=1\text{-}10^{-18}$$

Отметим, что для подтверждения такого высокого уровня надежности при испытаниях по схеме "да-нет" (12.68) потребовался бы объем испытаний $3\cdot10^{18}$.

Таким образом, за счет проведения форсированных испытаний и знания модели функционирования технического объекта возникает возможность во много раз уменьшить объем испытаний.

По такой же схеме удается снижать не только объем испытаний, но и их длительность. Для этого требуется знание закономерностей взаимосвязи между внешними воздействиями и наработкой до отказа. Например, при усталости в зоне наклонной ветви кривой Велера или при механическом изнашивании зависимость между средней наработкой до отказа и напряжениями в детали имеет вид: $\sigma^k m_t=$ $=$const, где k составляет в среднем: при изгибе улучшенных и нормализованных сталей 6; для закаленных сталей 9...12; при контактных нагружениях с начальным касанием по линии около 6; при изнашивании в условия ограниченной смазки от 1 до 2 и т.д. [60]. В этих случаях коэффициент форсирования испытаний принимает вид:

$$\eta_\phi=(\sigma_\phi/\sigma)^m ,$$

где σ_ϕ и σ напряжения при форсированных испытаниях и испытаниях в штатном режиме.

Часто взаимосвязь между параметрами при форсированных и нормальных испытаниях устанавливается на основе принципов линейного накопления повреждений и формул типа Бейли или подобных ей соотношений [44].

Из анализа (12.60), (12.61), (12.64) и (12.68) следует, что для подтверждения одного и того же уровня $P_{H.H}$ при прочих равных условиях при безотказных испытаниях требуется меньшее общее число испытываемых изделий, чем при испытаниях с отказами. Хотя при этом риск поставщика (см.следующий раздел) возрастает, тем не менее такой прием также используется для уменьшения объема испытаний.

Часто сокращение числа испытываемых образцов проводится за счет увеличения длительности испытаний. Так, в случае экспоненциального закона используется соотношение Nt=const, где N число испытываемых образцов; t время испытаний. При других законах распределения число испытываемых образцов с увеличением длительности испытаний сокращается еще более резко, чем в случае экспоненциального закона. Например, в случае нормального закона распределения наработки до отказа, используя выражения для квантиля, можно записать:

$$T = \hat{T} + U_p \hat{\sigma}_t \,, \tag{12.80}$$

где T - назначенный ресурс.

Пусть изделие испытывается на ресурс T_u, определяемый аналогичным соотношением:

$$T_u = \hat{T} + U_{p,u} \hat{\sigma}_t \,. \tag{12.81}$$

Выражая из (12.80) и (12.81) U_p через квантиль, полученный в испытаниях $U_{p,u}$, будем иметь:

$$U_p = U_{p,u} \frac{T}{T_u} - \frac{1}{\nu_t}\left(1 - \frac{T}{T_u}\right). \tag{12.82}$$

Рассмотрим численный пример. Известно, что самолет запускают в серийное производство, если стендовыми испытаниями узлов на предельных режимах работы установлена их практическая безотказность и, кроме того, если лидерные самолеты (обычно 2 или 3 экземпляра) налетали без отказа по тройному ресурсу. Поэтому будем считать, что N=3, изделия прошли испытания по тройному ресурсу без отказов n=0. Требуется определить нужную границу вероятности безотказной работы $P_{H,H}$ за ресурс при доверительной вероятности γ=0,9. Коэффициент вариации наработки до отказа примем $\nu_t = \hat{\sigma}_t / T = 0{,}2$.

Из соотношения (12.70) получаем нижнюю границу вероятности безотказной работы при длительных испытаниях

$$P^u_{H,H} = \sqrt[N]{1-\gamma} = \sqrt[3]{0{,}1} = 0{,}464$$

Считая, что наработка до отказа подчиняется нормальному закону, по таблицам нормального распределения находим квантиль $U_{p,u}$=0,1, соответствующий $P^u_{H,H}$=0,464, а из (12.82) получаем:

$$U_p = U_{p,u} \frac{T}{T_u} - \frac{1}{\nu_t}\left(1 - \frac{T}{T_u}\right) = -3.$$

По таблицам нормального распределения определяем нижнюю границу вероятности безотказной работы $P_{H,H}$ для штатного ресурса: $P_{H,H}(-3)$= 0,9986.

Таким образом, с помощью трех самолетов удалось установить нижнюю границу вероятности безотказной работы с доверительной вероятностью γ=0,9 для назначенного ресурса. Отметим, что если бы мы проводили испытания по схеме "да-нет", то потребовалось бы N=lg(1-γ)/lg$P_{H,H}$=1645 изделий.

Следовательно, использование испытаний с большой длительностью и безотказностью (что в данном случае является обязательным) позволило во много раз уменьшить как число испытываемых изделий, так и общее время испытаний.

Идеальная и реальная оперативные характеристики контроля. Риски поставщика и потребителя.

Цель контрольной процедуры, в отличие от ранее рассмотренной определительной процедуры, установление соответствия изделия заданным требованиям по надежности. Результатом контроля является решение о приеме или браковке изделия или всей партии изделий.

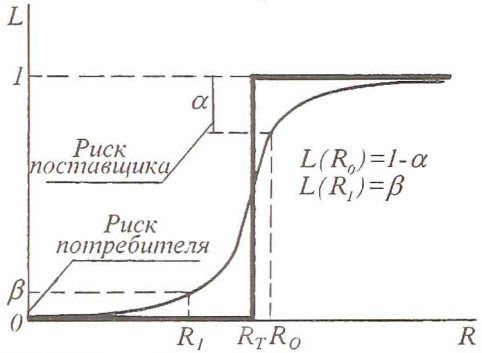


Рис.12.10. Оперативная характеристика контроля (жирная линия идеальная характеристика, сплошная тонкая - реальная характеристика)

На языке математической статистики задача контроля показателя надежности формулируется как задача проверки гипотезы о значениях показателя надежности. Пусть в технической документации на изделие указано требуемое значение показателя надежности R_T (в данном случае R может обозначать либо показатель типа наработки T, либо показатель типа вероятности безотказной работы P_H), тогда при разработке контрольной процедуры стремятся обеспечить приемку изделий с уровнем надежности $R \geq R_T$ и браковку с уровнем надежности $R < R_T$.

На рис.12.10 показана зависимость вероятности приемки L от значения показателя надежности R. Эта зависимость $L(R)$ называется оперативной характеристикой плана контроля. Идеальная оперативная характеристика показана жирной линией. Однако она практически недостижима, так как требует 100% контроля всех изделий при 100% надежности контроля в течение всего заданного ресурса. Реальная оперативная характеристика представлена на рис.12.10 тонкой линией. Вводят два уровня контролируемого показателя надежности приемочный R_0 и браковочный R_1, а также оговаривают значения $L(R_1)=\beta$ и $L(R_0)=1-\alpha$ в этих точках. При этом считается, что

изделия с уровнем надежности $R \geq R_0$ безусловно приемлемы для потребления и должны приниматься с достаточно высокой вероятностью не ниже $L(R_0)=1-\alpha$, а изделия с уровнем надежности $R \leq R_1$ неприемлемы и должны браковаться с высокой вероятностью не ниже $1-L(R_1)=1-\beta$. Вероятности противоположных событий $\alpha=1-L(R_0)$ и $\beta=L(R_1)$ (вероятности ошибок) характеризуют степень уверенности контролеров в правильности принимаемых решений. Они получили название α -риск поставщика и β -риск потребителя.

Таким образом, проверка идеальной гипотезы $R \geq R_T$ против $R<R_T$ заменена на проверку реальной гипотезы $R \geq R_0$ против $R<R_1$.

Величины α и β характеризуют максимально возможные вероятности ошибок в областях $R \geq R_0$ и $R \leq R_1$, соответственно. Это позволяет проверку сложных гипотез $R \geq R_0$ и $R \leq R_1$ заменить проверкой простых $R=R_0$ и $R=R_1$. Контроль, обеспечивающий заданные риски в этих точках, обеспечивает небольшие риски в областях $R \geq R_0$ и $R \leq R_1$.

Четыре числа R_0, R_1, α и β определяют две точки оперативной характеристики, что при выбранной процедуре контроля (одноступенчатая, последовательная), в свою очередь, определяет план контроля, включая объем наблюдений. Объем наблюдений является единственным ограничением, не позволяющим произвольно уменьшить риск и сблизить приемочный и браковочный уровни (свести R_0 и R_1 в точку R_T). Поэтому при планировании контроля следует выбирать R_0, R_1, α и β таким образом, чтобы объем контроля не превышал возможности поставщика. На различных этапах разработки, производства и эксплуатации изделий эти возможности различны, поэтому указанные параметры целесообразно выбирать для различных этапов различными.

Размещение интервала $[R_1, R_0]$ относительно заданного R_T при $\alpha=\beta$ должно выбираться с учетом ущерба, наносимого потребителю приемкой плохих изделий, и поставщику, - браковкой хороших. Если эти ущербы сопоставимы, то интервал $[R_1, R_0]$ размещается симметрично относительно точки R_T так, чтобы $L(R_T) \equiv 0{,}5$. Если ущерб потребителя невелик по сравнению с ущербом поставщика, то этот интервал смещается влево и наоборот. В общем случае точки R_0, R_1, α и β выбираются как точки равного ущерба для поставщика и потребителя.

Контроль показателей надежности может проводиться и без предварительного планирования объема наблюдений, когда контроль надежности совмещен с испытаниями изделий по другим параметрам или с их эксплуатацией.

В процессе разработки изделий контроль надежности проводят как минимум 1 раз на приемочных испытаниях, часто используя

статистику других испытаний. При серийном производстве контроль надежности обычно предусматривают в составе периодических испытаний. Контроль надежности высоконадежных мелкосерийных изделий целесообразно вводить в состав типовых испытаний, проводимых при изменении конструкции, технологии или комплектующих. Контроль надежности больших сложных изделий с широким применением резервирования может быть включен в состав приемо-сдаточных испытаний. Естественно, все изложенные ранее рекомендации для определительных испытаний (организация наблюдений, предварительная обработка статистической информации и т.д.) должны соблюдаться и при контрольных испытаниях.

12.5. Технологическое обеспечение надежности летательных аппаратов

Надежность ЛА закладывается на этапе её проектирования и конструирования. При этом невозможно обеспечить высокую надежность изделия с непрогрессивным рабочим процессом, несовершенной конструкторской схемой или несовершенными исполнительными механизмами. Кроме того, высокая надежность агрегатов, механизмов и деталей должна достигаться применением таких технических решений, при которых их надежность обеспечивается самой физико-химической природой протекающих процессов. Например, должны использоваться детали и механизмы, самоподдерживающие работоспособность: самоустанавливающиеся, самоприрабатывающиеся, самосмазывающиеся, самонастраивающиеся и т.д. Однако все заложенные технические решения дадут высокую надежность изделия только в том случае, если её сможет обеспечить технология изготовления и испытания объекта.

Технология изготовления, сборки и контроля изделия должна с максимальной производительностью и наименьшими затратами обеспечить качество продукции, в том числе и её надежность, заложенную в технической документации на изделие. Однако, связь параметров технологического процесса с показателями надежности изделия сложна, неоднозначна, проявляется через длительный промежуток времени вне сферы деятельности предприятия и, кроме того, многие требования по надежности вступают в противоречие с такими основными требованиями к технологическому процессу, как его производительность и экономичность. Вместе с тем, организация производства данного изделия, применяемые технологические процессы и методы контроля и испытаний оказывают самое решающее влияние на показатели надежности изделия.

Зависимость показателей надежности изделия от параметров технологического процесса можно представить в виде структурной схемы на рис.12.11.

Рис.12.11. Структурная схема связи параметров технологического процесса с показателями надежности изделия

В результате выполнения технологического процесса изготовления деталей и их последующей сборки в изделие обеспечиваются и контролируются на производстве выходные параметры продукции, заложенные в конструкторской документации (ТУ на параметры изделия) - точность, качество поверхностного слоя, механические свойства и др.

Однако, знание этих выходных параметров не позволяет сделать заключение о показателях надежности изделия, так как показатели надежности будут определяться отказами по таким эксплуатационным свойствам изделия (см. рис.12.11), как выносливость, износостойкость, теплостойкость и др. Установление же взаимосвязи между эксплуатационными показателями изделия и параметрами качества изготовляемых деталей и сборочных единиц само по себе является сложной, неоднозначной и многовариантной задачей.

Таким образом, в результате функционирования технологической системы изготавливается изделие с некоторым набором показателей качества $\{x_i\}$, соответствующих ТУ на изделие. В процессе эксплуатации изделия этот набор показателей качества $\{x_i\}$ и набор факторов внешних воздействий на изделие F_l определят набор эксплуатационных показателей изделия $\{Э_j\}$, т.е. эксплуатационные показатели изделия должны определяться некоторой функциональной зависимостью вида:

$$Э_j=\Phi_1(x_1, \ldots, x_n, F_1, \ldots, F_k) , \qquad (12.83)$$

при условии, что в ТУ на изделие правильно выбраны и регламентированы все показатели качества изделия, влияющие на его эксплуатационные свойства.

В свою очередь набор показателей $\{Э_j\}$, набор допусков на эксплуатационные показатели и набор факторов внешних воздействий должны определять через некоторую функциональную зависимость показатели надежности изделия.

Показатели качества изделия изготавливаются с определенными допусками и имеют рассеяние, т.е. являются случайными величинами с соответствующими законами распределения (часто с нормальным законом распределения). Внешние факторы также являются случайными величинами, поэтому соотношение (12.83) приводит к тому, что все $Э_j$ являются случайными величинами. Влияние рассеяния параметра качества x_i на эксплуатационный показатель $Э_j$ представлено на рис.12.12. На рис.12.12 указаны также границы допусков на x_i и $Э_j$.

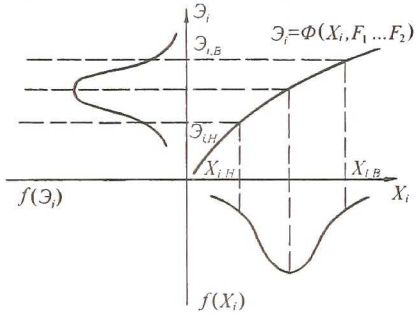


Рис.12.12. Рассеяние эксплуатационного показателя $Э_i$ в зависимости от рассеяния параметра качества x_i

Если воспользоваться результатами решения задачи об обеспечении работоспособности изделия по некоторому эксплуатационному параметру (12.47)-(12.52), то получим, что работоспособность изделия по этому эксплуатационному параметру будет определяться величиной квантиля (12.52):

$$U_p = -\frac{n-1}{\sqrt{(\nu_n n)^2 + \nu_Э^2}}, \qquad (12.84)$$

где $n=m_Э/m_n$ коэффициенты запаса надежности, вариации внешней нагрузки и эксплуатационного показателя. Используя (12.39), представим в виде:

$$(\nu_n n)^2 + \nu_Э^2 = n^2\left(\sum_{i=1}^{k}\frac{\partial \Phi}{\partial F_i}\sigma_{F_i}^2\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial \Phi}{\partial x_i}\sigma_{x_i}^2\right)^2. \qquad (12.85)$$

Из соотношений (12.84) и (12.85) и проведенного ранее анализа соотношения (12.52) следует, что вероятность безотказной работы изделия по эксплуатационным показателям зависит от коэффициента запаса надежности, вариации внешней нагрузки и вариации показателей качества изделия. Поэтому надежность изделия технологическими методами можно повысить увеличением средних значений показателя качества (его математического ожидания) при сохранении уровня его дисперсии при изготовлении, либо уменьшением

дисперсии показателей качества при неизменном его среднем значении. Увеличение среднего значения показателя качества определяется в основном использованием новых высокоэффективных материалов в конструкции и новых прогрессивных технологий при изготовлении деталей и сборке изделия. Уменьшение же дисперсии может быть достигнуто ужесточением технологического регламента и допусков на продукцию. Выбор первого либо второго направления в каждом конкретном случае определяется технико-экономической целесообразностью. Однако, второе направление (снижение дисперсии показателей качества) является в определенных условиях существенно более эффективным, чем первое, что было показано ранее при анализе соотношения (12.52).

Повышение качества продукции за счет снижения дисперсии показателей в процессе производства является одним из важнейших элементов технологической революции, прошедшей во всех ведущих странах мира. Причем, в условиях конкурентной борьбы на международных рынках качество продукции рассматривается этими странами как проблема национального выживания.

Производственные причины снижения надежности ЛА.

В настоящее время принято отказы, связанные с технологией изготовления изделия, классифицировать в соответствии со схемой [57], представленной на рис.12.13.

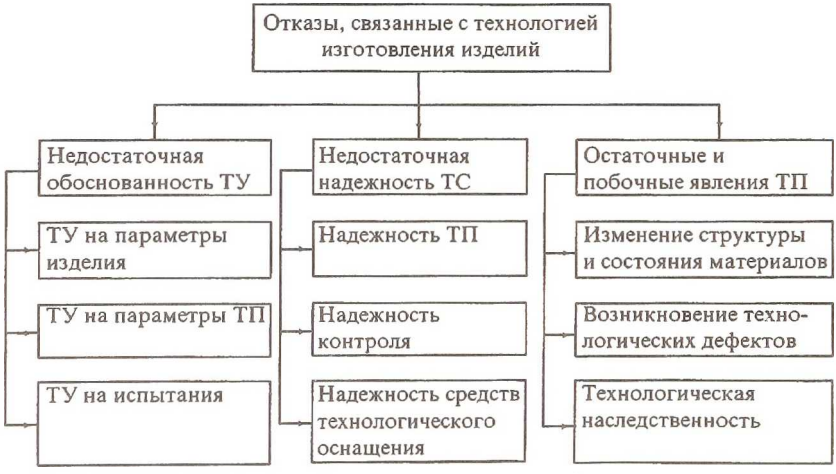


Рис.12.13. Классификация отказов, связанных с технологией изготовления изделия

Первая группа причин связана с недостаточной обоснованностью технических условий на параметры изделия и его составляющие, на параметры технологических процессов и методы испытания на надежность изделия и его составляющих.

Технические условия на изделие и его составляющие должны отражать основные требования к надежности изделия. Но при выполнении технологических операций по изготовлению деталей и их последующей сборке измеряются не показатели надежности изделия, которые практически и невозможно измерить на данном этапе технологического процесса. Поэтому в чертежах задаются параметры, удобные для измерения и которые должны были бы однозначно обеспечить требуемый уровень надежности изделия. Однако, параметры чертежей по точности, допускам и шероховатости и твердости, оказывается, еще не определяют однозначно показатели надежности. Даже более жесткая регламентация технологического процесса с ссылками на соответствующие технологические инструкции, ОСТы и ГОСТы часто также не обеспечивает одинаковые показатели надежности изделий, изготовленных на разных предприятиях. Поэтому чем выше требования к надежности изделия, тем большее число параметров должно быть оговорено техническими условиями и тем достовернее должны быть определены основные взаимосвязи между эксплуатационными и технологическими параметрами (12.83). Практически же такие вопросы решаются в процессах доводки изделий на стадии серийного производства специалистами КБ. В результате такой доводки происходит жесткая регламентация не только технологического процесса, а всей технологической системы конкретного производства, обеспечивающей необходимый уровень надежности изделий. При этом очень важную роль играют заданные технические условия на испытания. Если оценка надежности при испытаниях не обладает достаточной степенью достоверности как из-за выбранной методики, так и из-за заданных условий испытания, то невыявленные взаимосвязи приведут к преждевременным отказам при эксплуатации.

Таким образом, обоснованность технических условий для обеспечения заданного уровня надежности изделий связана не только с техническими условиями на изделие, на технологический процесс и на испытания, но и с жесткой регламентацией всей технологической системы (в том числе и технологического процесса) изготовления и испытания изделий.

Следующая группа, приводящая к отказам по вине технологии, связана с остаточными и побочными явлениями технологических процессов.

При выполнении любой технологической операции материалы деталей подвергаются очень значительным силовым, тепловым, химическим и другим воздействиям. Уровень этих воздействий во много раз превышает уровень воздействий при эксплуатации изделий и создает объективные условия для возникновения в изделиях таких нежелательных воздействий, как изменение свойств и структуры материалов, образование пор, раковин, трещин и микротрещин. Особенно

высоко такое воздействие на приповерхностный слой материала детали. В общем случае к технологическим дефектам относят любые несоответствия продукции требованиям, установленным нормативно-технической документацией. Поэтому к дефектам относят как отклонения свойств и состояний материалов (трещины, раковины, включения, структурные изменения, выход параметра качества за пределы допуска и т.д.), так и нарушения заданной точности формы и размеров. Обычно дефекты формы и размеров рассматривают отдельно как погрешности обработки, а к дефектам относят все остальные нарушения установленных требований к материалу и приповерхностным слоям.

Образование дефектов в изделии зависит от применяемого технологического метода, средств технологического оснащения, режимов обработки, систем автоматизации процесса и других характеристик. Для каждой технологической операции имеются, как правило, типичные виды дефектов, связанные как с нарушением хода процесса, так и с неблагоприятным сочетанием различных факторов при его выполнении.

Например, при отливке деталей из-за неравномерного остывания, окисления, попадания в материал различных включений и газа, могут появляться дефекты в виде трещин, раковин, пор, ликваций и неоднородности структуры. Кроме того, возникают остаточные напряжения, которые могут приводить к снижению эксплуатационных показателей деталей, а также к их короблению как при последующей обработке, так и в процессе эксплуатации. Аналогичные дефекты возникают при сварке, термической и химико-термической обработке, нанесении покрытий.

Особое влияние на работоспособность изделий оказывает механическая и электрохимическая обработки, которые придают деталям окончательную форму и свойства рабочим поверхностям деталей. В результате такой обработки поверхность материала и приповерхностные слои переходят в особое состояние с комплексом свойств, существенно отличающимся от свойств материала в объеме детали.

Часто различные варианты технологии, приводящие к одинаковым, с точки зрения регламентированного качества параметра, результатам, при более глубоком изучении обнаруживают разные склонности к образованию дефектов. Так, шлифование, полирование и алмазное выглаживание позволяют получить одинаковый параметр шероховатости поверхности, однако шлифованная поверхность имеет большее число рисок глубиной до 1 мкм, полированная существенно меньшее число рисок с глубиной до 0,05 мкм, а выглаженная практически не имеет рисок. Это приводит к существенному отличию в таких эксплуатационных свойствах, как выносливость, износостойкость и коррозионная стойкость.

У никелевых и титановых сплавов после электрохимической полировки существенно снижается предел выносливости по сравнению с деталями после механической обработки с теми же параметрами шероховатости поверхности. Более того, на 10...15% снижается предел прочности на растяжение и изгиб, в то же время предел прочности на сжатие и кручение практически не изменяется. Снятие же припуска после электрохимической обработки механическим методом (от 0,15 до 0,3 мм) восстанавливает значения этих параметров. У ряда алюминиевых сплавов механическая и электрохимическая обработка незначительно изменяет значения пределов выносливости и прочности.

В пределах одного технологического метода на возможность возникновения дефектов основное влияние оказывают обычно выбранные средства технологического оснащения и режимы обработки. Например, широко известно, что в зависимости от режимов резания и геометрических параметров режущего инструмента предел выносливости обрабатываемого материала может измениться более чем в 2 раза при практически одной и той же шероховатости поверхности. Еще более сильное влияние оказывает изменение режимов шлифования, особенно высокопрочных материалов.

Часто считают, что возникновение дефектов в процессе обработки является следствием нарушения технологической дисциплины, наличие оборудования с низкими техническими характеристиками, нарушения ритмичности работы предприятия, плохой организации труда и т.д. Такой взгляд является односторонним, так как фиксирует лишь грубые нарушения в ходе технологического процесса. Надо отметить, что по существующим данным 85% технологических дефектов связано с недостатками технологии, в основном из-за неправильного обоснования технологических систем, а только 15% являются следствием нарушения технологической дисциплины.

В действительности физико-химические воздействия, которые сопровождают любой технологический процесс, порождают в материале изделия отклонения от первоначального состояния и изменение свойств материала. Выход этих отклонений (они существуют всегда) за установленные пределы и приводит к возникновению дефектов. Поэтому технологический процесс, бездефектный при одних требованиях к изделию, будет дефектным при повышенных нормативах на выходные параметры.

Хотя основную роль в формировании показателей качества выпускаемых изделий часто играют финишные операции технологического процесса, однако многие свойства передаются с промежуточных операций на последующие. Явление переноса свойств изделия от предыдущих операций к последующим получило название технологического наследования, а сохранение этих свойств технологической наследственности [57]. Носителем информации о наследственнос-

ти являются материал детали и её геометрическая форма. Физико-химическая природа технологической наследственности особенно хорошо видна при анализе формулы суммирования парциальных повреждений. В соответствии с этим соотношением разрушение материала наступает при выполнении условия:

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{\Delta t_i}{\tau\left(\sigma_i T_i\right)} \cong 1 \ , \qquad (12.86)$$

где Δt_i промежуток времени нахождения материала детали при растягивающих напряжениях σ_i и температуре T_i; $\tau(\sigma_i, T_i)$ долговечность материала детали при тех же напряжениях и температуре. В соотношении (12.86) каждое слагаемое $\Delta t_i/\tau(\sigma_i, T_i)$ характеризует долю потерянной долговечности (ресурса) при данном нагружении детали в течение Δt_i.

Часть слагаемых в (12.86) можно отнести к технологическим операциям, а часть к эксплуатации. Видно, что в результате определенных технологических операций происходит частичная потеря долговечности всей детали из-за потери её долговечности по определенным сечениям, в которых действуют растягивающие напряжения (кинетическая теория прочности).

После ряда технологических операций, особенно термических или упрочняющих, удается восстанавливать первоначальную долговечность всей детали или её наиболее опасных сечений, к которым, в частности, относятся и приповерхностные слои.

Полученные на отдельных операциях дефекты (в том числе микротрещины) могут либо развиваться, либо залечиваться на последующих операциях. Поэтому технологическая наследственность может играть как положительную, так и отрицательную роль в зависимости от того, какие свойства сохраняются и передаются готовому изделию.

Технологическая наследственность в большинстве случаев оказывает все-таки отрицательное влияние на показатели качества и является побочным явлением при обработке деталей и их сборке. Поэтому необходимо технологический маршрут строить таким образом, чтобы исключить передачу дефекта или погрешности обработки с операции на операцию, сделать операции как бы независимыми в технологическом отношении. Считается, что наиболее благоприятным будет такой технологический процесс, где на начальных операциях происходит практически полная ликвидация отрицательных свойств и эти свойства не наследуются на финишных операциях.

Следующая группа причин, приводящая к недопустимым производственным отказам изделий, связана с недостаточной надежностью технологической системы изготовления изделия. Как было отмечено при анализе первой группы причин, в результате

доводки (на стадии опытного или серийного производства) возникает необходимость в жесткой регламентации технологической системы производства изделия. Однако в процессе эксплуатации технологической системы её свойства изменяются и, более того, она сама, как любое техническое изделие, подвержена отказам. Следовательно, технологическая система должна характеризоваться таким важным свойством, как надежность, т.е. свойством сохранять во времени способность обеспечивать изготовление продукции в заданном объеме, с заданной производительностью и заданными параметрами качества. Чем выше заданная надежность изделия, тем выше должна быть надежность технологической системы.

Сделаем следующий простой расчет. Как уже отмечалось, ЛА состоит из 10^5 деталей, которые проходят через пять основных технологических переделов получение материалов, формообразование, обработка, сборка и испытания. Каждый из этих переделов содержит ряд технологических операций, на которых необходимо выполнить технологические задания по параметрам качества детали. Пусть на всех технологических операциях в сумме контролируется 10^2 показателей на деталь. Если считать, что вероятности выполнения технологического задания по этим показателям P одинаковы и независимы, то полная вероятность выполнения задания по качеству изделия определится соотношением (12.40):

$$P_u=(P)^N, \qquad (12.87)$$

где N равно произведению числа деталей на число контролируемых показателей качества, которые влияют на надежность всего изделия.

Если считать, что только один из 10^3 параметров деталей влияет на надежность изделия, то в нашем случае $N = 10^4$. Пусть вероятность $P = 0{,}9999 = =1- 10^4$, тогда из (12.87) получим:

$$P_u = \left(1-10^{-4}\right)^{10^4} \cong 0 \ .$$

Следовательно, даже при такой высокой вероятности выполнения задания по параметру качества детали, как P = 0,9999, будет получен обязательно отказ в изготовленном изделии.

Таким образом, чем меньше элементная надежность выполнения задания по параметру, чем больше величина N в (12.87), тем ниже надежность технологической системы. Поэтому важной задачей обоснования и создания технологических систем производства ЛА является выявление наименее надежных элементов технологических систем (дающих наибольшие дисперсии показателей качества) и их совершенствование, а также сокращение числа элементов в системе, в том числе и за счет их кооперации.

На рис.12.14 представлена типовая схема повышения надежности технологической системы за счет создания обоснован-

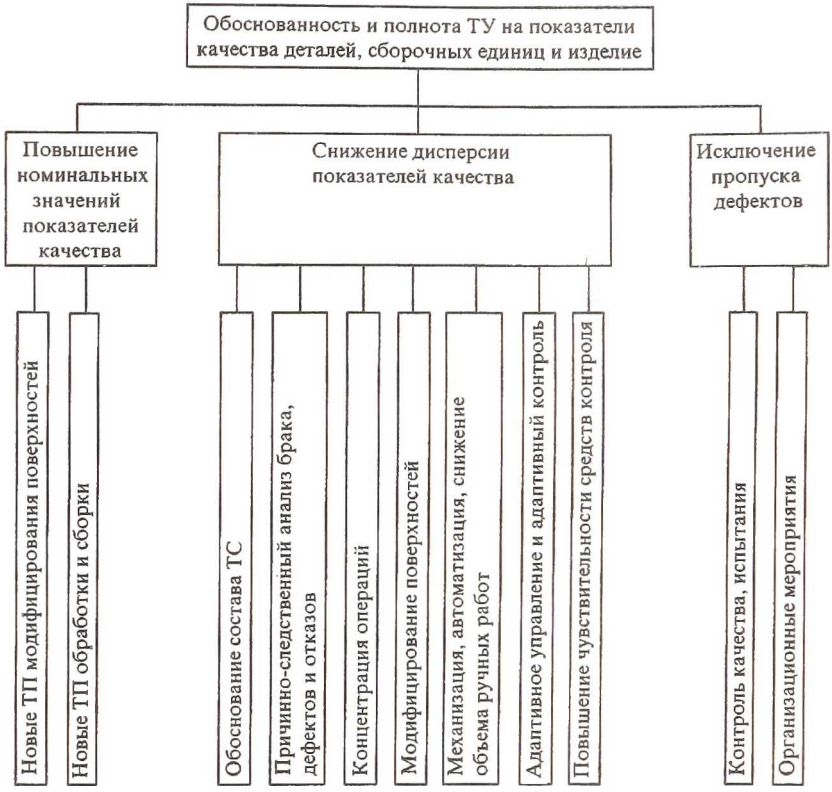


Рис.12.14. Схема мероприятий повышения надежности технологических систем за счет обоснованности и полноты технических условий на показатели качества деталей сборочных единиц и изделий

ных и полных технических условий на показатели качества деталей, сборочных единиц и изделия в целом.

В связи с таким сильным влиянием надежности технологической системы на надежность изделия в последнее десятилетие активно развиваются методы формализованного описания технологических процессов с точки зрения науки о надежности технологических систем. При этом технология изготовления изделия представляется в виде технологической системы, которая должна обеспечить определенную вероятность выполнения задания по параметрам качества, параметрам производительности и параметрам затраченных ресурсов.

Основные понятия о технологических системах и методах оценки их надежности.

Под **технологической системой** понимают совокупность функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в

регламентированных условиях производства заданных технологических процессов или операций (ГОСТ 27.004-85).

Технологическая система является частью производственной системы и, как любая другая система, имеет свою структуру. Состав и структура технологической системы, условия производства и режим работы регламентируются конструкторской, технологической и другой технической документацией. Изменение этой документации приводит к соответствующему изменению системы.

Все технологические системы можно разделить на четыре иерархических уровня: технологические системы операций, технологические системы процессов; технологические системы производственных подразделений и технологические системы предприятий.

Технологическая система процесса включает в себя в качестве подсистем совокупность технологических систем операций, относящихся к одному методу (формообразования, обработки, сборки, контроля и испытаний) или к одному наименованию изготовляемой продукции. Следовательно, технологическая система операции является подсистемой технологической системы процесса.

Любая технологическая система может быть разбита на элементы, которые являются её частью и условно принимаются за неделимые на данной стадии анализа системы. Различают следующие виды технологических систем: последовательная, параллельная, комбинированная.

На рис.12.15 представлена технологическая система, состоящая из n технологических элементов, описывающих выполнение определенных технологических операций. На вход первого элемента подается полуфабрикат, характеризуемый $x_i(0)$ параметрами качества. После преобразования в первом элементе (выполнения первой технологической операции) эти параметры принимают с вероятностью $P_1(i, t)$ значения $x_i(1)$. Вероятность $P_1(i, t)$ является вероятностью выполнения технологического задания первым технологическим элементом по параметру x_i. В связи с тем, что по мере эксплуатации технологического элемента его свойства изменяются, эта вероятность является функцией времени. Далее параметры $x_i(1)$ попадают на вход второго элемента и с вероятностью $P_2(i, t)$ преобразуются в $x_i(2)$ и т.д.

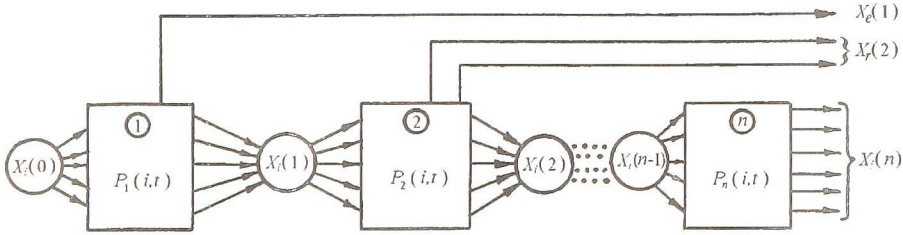


Рис.12.15. Структурная схема технологической системы

Некоторые параметры качества после первой, второй и т.д. операции могут не изменяться на последующих операциях и характеризовать готовую продукцию на выходе из n-го элемента. На рис.12.15 это $x_e(1)$ параметры после первой операции, $x_r(2)$ - после второй операции и $x_i(n)$ после n-ой операции. Таким образом, готовая продукция будет характеризоваться набором параметров качества $\{x_e(1), x_r(2), \ldots, x_i(n)\}$. Задача технологической системы обеспечить значения параметров качества после каждого элемента и после выполнения последней операции в пределах допусков, заданных в технических условиях на детали, сборочные единицы и изделие в целом.

Все технологические системы могут быть с жесткой и нежесткой связью подсистем или элементов. Причем, под технологической системой с жесткой связью понимают такие системы, у которых отказ хотя бы одной из подсистем вызывает немедленное прекращение функционирования технологической системы в целом. В технологической системе с нежесткой связью в этом случае не происходит немедленного прекращения функционирования всей системы.

Также отметим, что по уровню автоматизации выделяют: механизированную, автоматизированную и автоматическую технологические системы. Кроме того, по уровню специализации бывают специальные, специализированные и универсальные технологические системы.

Уровень и вид технологической системы является определяющим признаком для выбора критериев отказов и предельных состояний, показателей надежности и методов их оценки.

Для технологических систем, так же как и для технических систем (п.12.2), вводятся понятия работоспособное и неработоспособное состояние, исправные и неисправные состояния, а также предельное состояние. Например, под работоспособным состоянием технологической системы понимают такое её состояние, при котором значения параметров и показателей качества изготавливаемой продукции, производительности, материальных и стоимостных затрат на изготовление продукции соответствуют требованиям, установленным в нормативно-технической, конструкторской и технологической документации. Видно, что данное определение соответствует общему определению работоспособного состояния (п.12.2), однако конкретизирует способность технологической системы выполнять заданные функции по показателям качества, производительности и затрачиваемым ресурсам.

В связи с этим определением неработоспособное состояние технологической системы может возникать по параметрам качества, производительности или затрачиваемым ресурсам. Аналогично даются определения других состояний системы.

В технологической системе, также как и в любой технической системе, анализ работоспособности основан на анализе отказов. По характеру нарушения работоспособности выделяют функциональные и параметрические отказы.

Под функциональным отказом понимают прекращение функционирования технологической системы, не предусмотренное регламентированными условиями производства или конструкторской документацией. При этом возможно как полное, так и частичное прекращение функционирования. Примером частичного функционального отказа может служить поломка одного из инструментов при обработке детали на автоматической линии. При этом может происходить выпуск продукции, но без обработки соответствующих поверхностей.

Параметрический отказ характеризуется тем, что система продолжает функционировать, но как минимум один из параметров технологического процесса выходит за допустимые пределы. Например, выход значений показателей качества деталей за поле допуска на обработку, снижение ритма выпуска ниже заданного уровня, нерегламентированное изменение режимов обработки, превышение материальных и трудовых затрат, недопустимые загрязнения окружающей среды и т.д.

Оценка надежности технологических систем производится на стадии проектирования и её эксплуатации. Эта оценка проводится с целью оптимизации надежности вновь разрабатываемых или поддержания необходимого уровня надежности действующих систем. Оценка надежности проводится в результате определительной процедуры и проверяется с регламентированной периодичностью в результате контрольной процедуры.

Результаты оценки технологических систем используются для: разработки и выбора оптимального варианта проектируемого технологического процесса или операции на этапе технологической подготовки производства; оптимизации технологических маршрутов и режимов обработки; выбора средств технологического оснащения; управления технологическими процессами; выбора методов и планов статистического регулирования технологических процессов (операций); уточнения требований к качеству материалов, заготовок и комплектующих; выбора и корректировки планов испытаний и контроля готовой продукции; установления ритма выпуска продукции; определения периодичности подналадок технологического оборудования и замены инструмента; установления факторов, ведущих к отказам; нормирования показателей надежности вновь разрабатываемых систем; разработки и проверки эффективности мероприятий по повышению надежности систем; оптимизации методов эксплуатации, обслуживания и ремонта средств технологического оснащения.

Показатели надежности технологических систем и средств технологического оснащения выбирают из числа перечисленных в п.12.2, а также используются специфические показатели, естественно, введенные на основе показателей п.12.2. К ним относятся: установленная безотказная наработка (ресурс, срок службы); вероятность безотказной работы технологической системы по параметрам продукции (производительности, затратам); назначенная наработка технологического комплекса до подналадки; вероятность выполнения технологической системой задания по объему выпуска.

Установленная безотказная наработка (ресурс, срок службы) - это гамма-процентная наработка (ресурс, срок службы) технологической системы при $\gamma = 100\%$.

Вероятность безотказной работы технологической системы по параметрам продукции (производительности, затратам) - это вероятность того, что в пределах заданной наработки не происходит отказа технологической системы по перечисленным параметрам.

Вероятность выполнения технологической системой задания - это вероятность того, что объем выпуска технологической системой годной продукции и затраты на её изготовление за рассматриваемый интервал времени соответствуют требованиям документации. В вероятности выполнения технологической системой задания по объему фактор затрат не учитывается.

Кроме единичных показателей надежности вводятся комплексные показатели: коэффициент использования технологической системы, коэффициент выхода годной продукции; коэффициент сохранения производительности технологической системы, коэффициент расхода i-го вида материальных (стоимостных) затрат.

Методы оценки надежности системы выбираются исходя из критериев отказов. При этом для оценки надежности по параметрам качества продукции рассматривают четыре группы показателей, характеризующие: точность технологического процесса и средств технологического оснащения; технологическую дисциплину; выполнение заданий по конкретным параметрам качества продукции; комплексные показатели.

Оценка надежности выполнения задания технологической системой по параметрам качества продукции.

Рассмотрим некоторый n-ый элемент технологической системы (рис.12.15), который формирует параметры качества продукции $x_i(n)$. Индекс i относится к i-ому показателю качества детали после выполнения технологической операции, соответствующей n-ому элементу.

Значение x_i зависит от свойств материала, режимов обработки, конструктивных особенностей обрабатывающей системы,

точности настройки средств технологического оснащения, точности измерения самой величины и воздействия внешних факторов.

Свойства материала заготовки характеризуются не только средними значениями показателей качества, но и их рассеянием, возникающим как в заготовках из одной плавки и партии, так и рассеянием из-за наличия заготовок из разных плавок и разных партий.

Режимы обработки также характеризуются не только средними значениями, но и их рассеянием из-за физико-химических флуктуаций в зоне взаимодействия инструмента с деталью и наличия обратной связи в системе станок-приспособление-инструмент-заготовка-станок (система СПИД), а также рассеянием из-за того, что система СПИД является нежесткой, теплопроводящей и т.д.

Точность настройки средств технологического оснащения и точность измерения параметра также характеризуются не только средними значениями, но и определенным рассеянием, особенно в случае ручных операций.

Таким образом, любой параметр качества продукции x_i является сложной функцией переменных, которые являются случайными величинами, зависящими от наработки технологического элемента:

$$x_i=\varphi(z_1, z_2, \ldots, z_k) , \qquad (12.88)$$

где z_j случайные величины, описывающие перечисленные выше факторы показатели свойств материала, параметры режима обработки, параметры точности настройки средств технологического оснащения и т.д.

Для анализа влияния факторов z_j на показатель качества x_i необходимо знать в общем случае функции распределения случайных величин z_j (п.12.3). Однако, с целью упрощения задачи воспользуемся соотношением (12.39), считая, что величины z_j некоррелированы и характеризуются математическим ожиданием m_{z_j} и стандартным отклонением σ_{z_j}. В этом случае параметр качества x_i в окрестности своего математического ожидания может быть описан распределением с параметрами:

$$m_{x_i} = \varphi\left(m_{z_1}, m_{z_2}, \ldots, m_{z_k}\right), \quad \sigma^2_{x_i} = \sum_{j=1}^{k}\left(\frac{\partial\varphi}{\partial z_j}\right)^2_{z_j=m_{z_j}} \sigma^2_{z_j}. \qquad (12.89)$$

Таким образом, соотношение (12.89) устанавливает приближенную связь между характеристиками распределения параметра качества продукции и характеристиками распределений свойств заготовки и свойств технологической системы элемента.

Условием безотказности технологического элемента при выполнении задания (технологической операции) по параметру качества x_i за наработку T будет выполнение неравенства:

$$x_{i,H} \le x_i(t) \le x_{i,B} , \qquad (12.90)$$

где $x_{i,H}$ и $x_{i,B}$ - нижнее и верхнее предельное отклонение для параметра x_i, установленное в нормативно-технической документации.

Вероятность выполнения задания n-м технологическим элементом параметру x_i определяется из соотношения, аналогичного вероятности безотказной работы (п.12.3):

$$P_i(n, t) = P\{x_{i,H} \le x_i(t) \le x_{i,B}\} , \qquad (12.91)$$

где $P\{x_{i,H} \le x_i(t) \le x_{i,B}\}$ - вероятность события.

Если задание технологической системы заключается в одновременном выполнении неравенства (12.90) для набора параметров от i=1 до i=k, то вероятность выполнения задания будет:

$$P_i(n, t) = P\{x_{1,H} \le x_1(t) \le x_{1,B}; \ldots; x_{k,H} \le x_k(t) \le x_{k,B}\} . \qquad (12.92)$$

В случае, когда величины $x_i(t)$ независимы, соотношение (12.92) примет вид:

$$P(n,t) = \prod_{i=1}^{k} P_i(n,t) . \qquad (12.93)$$

При задании одностороннего допуска на параметр x_i в виде

$x_i \le x_{i,B}$ или $x_i \ge x_{i,H}$,

соотношение (12.91) примет вид:

$P_i(n, t)=P\{x_i \le x_{i,B}\}$ или $P_i(n, t)=P\{x_i \ge x_{i,H}\}$,

соответственно.

Вычисление вероятности $P_i(n, t)$ производится по одному из алгоритмов, изложенных в п.12.3.

Например, если известна плотность распределения $f(x,t)$ параметра качества и заданы допуски x_H и x_B на этот параметр в виде детерминированных величин, то вероятность выполнения задания будет равна:

$$P(n,t) = \int_{x_H}^{x_B} f(x,t)dx . \qquad (12.94)$$

В случае, когда распределение $f(x,t)$ определяется нормальным законом, выражение (12.94) примет вид:

$$P(n,t) = \Phi(U_{p,B}) - \Phi(U_{p,H}) , \qquad (12.95)$$

где $U_{p.B} = \dfrac{x_B - m_x}{\sigma_x}, U_{p,H} = \dfrac{x_H - m_x}{\sigma_x}$ - квантили нормального распределения; $\Phi(U_p)$ - интеграл ошибок (п.12.3).

Таким образом, если известна плотность распределения вероятности параметра качества x, зависящая от параметров технологического элемента (12.88), и известны допуски x_B и x_H, то по

соотношению (12.94) определяем вероятность выполнения задания технологической системой по этому параметру в течение заданной наработки.

Если полученное значение $P(n,t)$ меньше допустимого, то проводят анализ технологической системы и соответствующие мероприятия по повышению надежности технологической системы. Из (12.95) видно, что увеличить надежность $P(n,t)$ можно в основном за счет уменьшения дисперсии σ_x или, как следует из (12.89), за счет уменьшения дисперсии поставляемых заготовок, дисперсии режимов обработки и дисперсии средств технологического оснащения путем их подналадки или замены на более точные.

В процессе эксплуатации технологической системы параметры распределения m_x и σ_x будут изменяться, приводя к изменению вероятности выполнения задания. Поэтому постоянный (или периодический) статистический контроль вероятности выполнения задания создает предпосылки для выпуска бездефектной продукции за счет оперативной подналадки технологической системы с целью восстановления её надежности. Т.е. в этом случае возникает возможность выпускать бездефектную продукцию не за счет обнаружения уже полученного брака и последующей подналадки технологической системы, а за счет адаптивного управления качеством и изготовления бездефектной продукции.

На этапе технологической подготовки производства и проектирования технологической системы по заданным значениям $P(n,t)$ и x_H и x_B осуществляют подбор составляющих технологической системы.

Отметим, что обратная задача определения допусков x_H и x_B по заданному значению $P(n,t)$ не имеет в общем случае однозначного решения, так как соотношение (12.95) является одним уравнением с двумя неизвестными. В связи с этим задачу решают, либо выбирая допуски симметрично относительно m_x

$$x_B=m_x+U_p\sigma_x,\ x_H=m_x-U_p\sigma_x\ , \qquad (12.96)$$

либо одна из границ допуска задается из конструктивных или технологических соображений, а другая - из решения уравнения (12.94) или (12.95).

Обычно в случае технологических допусков интервал $[x_B,\ x_H]$ выбирают равным $6\sigma_x$, что в случае симметричного интервала и нормального распределения соответствует вероятности выполнения задания $P(n,t) = 0{,}997$.

Для нахождения параметров распределения (12.94) и (12.95) конкретных технологических систем значения m_x и σ_x выбирают либо из справочных данных, либо находят путем расчетов по данным специальных экспериментов, либо путем расчетов по данным, полученным в процессе эксплуатации этого элемента.

В случае, когда на параметр x заданы односторонние допуски, то вероятности выполнения задания для нормального распределения параметра x определяются из соотношений:

$$P(n,t) = P(x \le x_B) = 0{,}5 + \Phi\left(\frac{x_B - m_x}{\sigma_x}\right),$$
$$P(n,t) = P(x \ge x_H) = 0{,}5 - \Phi\left(\frac{m_x - x_H}{\sigma_x}\right). \qquad (12.97)$$

В ряде случаев ограничения на параметр x в (12.90) сами являются случайными величинами и описываются соответствующей плотностью распределения вероятности (12.84). Вероятность выполнения задания технологической системой, например, для одностороннего допуска $x \ge x_H$ и нормальных законов распределения будет иметь вид (12.50) и (12.52):

$$P(n,t) = 0{,}5 - \Phi(U_p), \qquad (12.98)$$

$$U_p = -\frac{n-1}{\sqrt{(\nu_H n)^2 + \nu_x^2}}, \qquad (12.99)$$

где $n = m_x/m_H$, $\nu_H = \sigma_H/m_H$ и $\nu_x = \sigma_x/m_x$.

Отметим, что в соотношениях (12.95) и (12.97) выражению для квантиля можно придать вид, аналогичный (12.99). При этом, с точки зрения теории надежности технологических систем, отношение допуска к математическому ожиданию в (12.95) и (12.97) имеет смысл коэффициента запаса надежности технологической системы по аналогии с коэффициентом запаса надежности по параметру.

Таким образом, в общем случае вероятность выполнения задания технологической системой по некоторому параметру качества определяется квантелем распределения, который в свою очередь зависит от коэффициента запаса надежности технологической системы ($n = m_x/m_H$ или $n = m_x/m_B$), и коэффициентов вариации параметра качества ($\nu_x = \sigma_x/m_x$) и допусков на этот параметр ($\nu_H = \sigma_H/m_H$, $\nu_B = \sigma_B/m_B$). Учитывая, что с ростом $|U_p|$ значение $P(n,t)$ растет, существуют две принципиально различные возможности повышения надежности технологических систем: первая за счет увеличения коэффициента запаса надежности и вторая за счет снижения дисперсии (рис.12.14).

Первая возможность связана либо с увеличением допусков на параметр, либо с увеличением его номинального (среднего) значения. Однако возможности увеличения границ допусков ограничены конструктивными особенностями изделия и его эффективностью. Увеличение номинальных значений параметра качества связано с

использованием новых материалов, новых технологий обработки, сборки и модифицирования поверхностей (см. рис.12.14).

Однако наиболее широкие возможности повышения вероятности выполнения задания технологической системой по параметру качества появляются при снижении дисперсии показателей качества. Снижение дисперсии показателей качества может быть достигнуто (см. рис.12.14) за счет: снижения дисперсии свойств поставляемых заготовок; использования средств технологического оснащения с меньшим рассеянием параметров при настройке; использования новых технологий, имеющих малое рассеяние в режимах обработки и получаемых свойствах деталей; модифицирования обрабатываемых поверхностей; концентрации технологических операций; механизации и автоматизации процессов и исключения ручных операций; использования адаптивного управления и контроля; повышения чувствительности средств контроля и др.

Вероятность выполнения задания технологической системой по параметру качества может быть определена на основе альтернативных оценок при выборочных испытаниях. В этом случае оценка изделия по параметру проводится по схеме "да-нет", т.е. изделие либо бракуется, либо признается годным. Оценка вероятности выполнения задания и дисперсия этой оценки определяются по соотношениям:

$$\hat{P} = 1 - \frac{n}{N},\ \hat{\sigma}_x^2 = \frac{\hat{P}\left(1-\hat{P}\right)}{N}, \qquad (12.100)$$

где N - объем выборки, n - число забракованных изделий.

При этом верхняя и нижняя граница вероятности выполнения задания определяется из биноминального распределения (12.68) или более простых соотношений:

$$P_B = \hat{P} + U_\alpha \hat{\sigma}_x,\ P_H = \hat{P} - U_\alpha \hat{\sigma}_x,$$

где U_α квантиль распределения Стьюдента для заданной доверительной вероятности α и числа измерений N. При $N\hat{P} > 10$ и $N(1-\hat{P}) > 10$ в качестве U_α можно использовать квантиль нормального распределения для заданной доверительной вероятности α.

Альтернативные оценки используются на определительных и контрольных испытаниях технологических систем, однако они не позволяют выявить причинно-следственные связи в снижении надежности.

Если параметр качества x_j, формируемый i-м технологическим элементом с вероятностью $P_j(i,t)$, подвергается контрольной процедуре с вероятностью обнаружения дефекта $P^{(k)}$, то эти два элемента (технологическая операция и операция контроля) с точки зрения надежности имеют параллельное включение (рис.12.16).

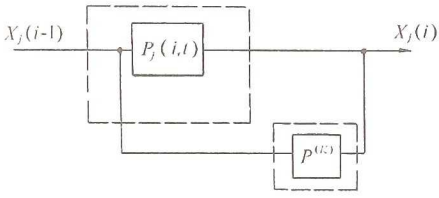


Рис.12.16. Структурная схема расчета надежности при включении операции контроля *j*-го параметра качества в технологическую систему

Используя (12.41), получим, что вероятность выполнения задания технологической системой увеличивается за счет введения контрольной операции и определяется соотношением:

$$P_j^{(k)}(i,t)=1-(1-P_j(i,t))(1-P^{(k)})=$$
$$=1-(1-P_j(i,t))\beta\,, \qquad (12.101)$$

где $\beta=1-P^{(k)}$ - риск потребителя.

При объединении элементов технологической системы в технологическую систему процесса возникает необходимость учета передачи дефекта по некоторому параметру с одной операции на другую. В зависимости от вида дефекта, вида параметра качества, вида операции дефект может устраняться, передаваться частично или полностью. Два последних случая связаны с понятием технологической наследственности.

Для характеристики вероятности передачи дефекта с одной операции на другую вводится коэффициент передачи дефекта, который характеризует стохастическую связь между погрешностями обработки на двух операциях и позволяет оценить практическую значимость и необходимость учета этой связи в расчетах на надежность.

Коэффициент передачи дефекта с первой операции по *k*-му параметру на вторую по тому же *k*-му параметру определяется по опытно-статистическим данным на основании соотношения:

$$k_D(1,k;2,k)=\frac{d(1,k;2,k)}{d(1,k)}\cdot\frac{n}{n-d(2,k)}\,, \qquad (12.102)$$

где n число изготовленных единиц продукции, проверенных после первой операции и второй операции по *k*-му параметру; $d(1,k)$ - числа единиц продукции, дефектных по l-му параметру после первой операции; $d(2,k)$ число единиц продукции, дефектных по *k*-му параметру после второй операции; $d(1,k;2,k)$ количество единиц продукции, дефектных по l-му параметру после первой операции и имеющих дефект по *k*-му параметру после второй операции.

В случае независимости возникновения погрешностей обработки на первой и второй последовательных операциях вероятность выполнения задания по *k*-ому параметру после двух операций рассчитывается по соотношению, описывающему включение коэффициента передачи дефекта по надежности параллельно к первой операции (рис.12.17), т.е.:

$$P_k(1,2)=P_k(2)[1-k_D(1,k;2,k)(1-P_k(1))] \qquad (12.103)$$

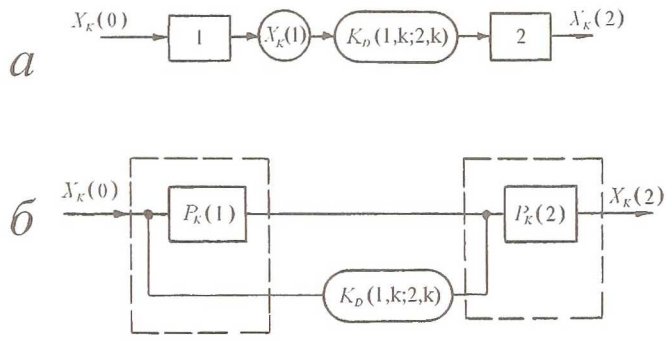


Рис.12.17. Схема передачи дефекта по параметру качества x_k с первой технологической операции на вторую (а) и структурная схема расчета системы на надежность (б)

Если $k_D(1,k;2,k)=0$, то (12.103) принимает вид $P_k(1,2)=P_k(2)$ и дефект не передается, если же $k_D(1,k;2,k)=1$, то (12.103) принимает вид $P_k(1,2)=P_k(1)P_k(2)$ и все дефекты с первой операции переходят в сумму дефектов после выполнения двух операций.

В общем случае дефект с первой операции по l-му параметру может после второй операции проявиться в k-м параметре качества. В этом случае коэффициент передачи дефекта с первой операции по l-му параметру на вторую по k-му параметру определяется по аналогичным соотношениям.

Если число технологических операций более двух, то для вероятности выполнения задания получается система рекурентных соотношений, в которой последовательно, начиная с первой технологической операции, проводится расчет для последующей и так до последней операции технологической цепочки. Естественно, что если дефекты передаются полностью, то система рекурентных соотношений переходит в формулу умножения вероятностей для каждой технологической операции. Например, для цепочки последовательных m технологических операций вероятность выполнения задания по k-му параметру качества имеет вид:

$$P_k(1,2,\ldots,m,t)=\prod_{i=1}^{m}P_k(i,t)\ , \qquad (12.104)$$

где $P_k(i,t)$ - вероятность выполнения задания по k-му параметру на i-й технологической операции.

Соотношение (12.104) мажорирует снизу аналогичное соотношение для $k_D<1$. Таким образом, оценку надежности технологических систем целесообразно проводить в первую очередь по тем показателям качества, которые определяют эксплуатационные показатели изделия.

Условием выбора оптимальных элементов ТС системы по критерию надежности является получение заданного уровня показателя качества с заданной вероятностью выполнения задания P.

Величина P может служить критерием аттестации технологической системы и технологического процесса (операции). Этот критерий имеет такое же, а возможно и большее значение, чем производительность и коэффициент затраченных ресурсов. В настоящее время этот критерий является одним из основных критериев оценки сертифицированных производств.

Повышение качества деталей и сборочных единиц, определяемых уровнем надежности технологической системы, обеспечивается подбором элементов системы и маршрута технологии. Так как безотказность технологической системы тем выше, чем меньше дисперсия технологических элементов и формируемых этим элементом показателей качества, то предпочтительней такой набор технологических операций, который обеспечивает наибольшие значения коэффициента запаса надежности и наименьшие значения дисперсии. Важным направлением достижения высокой надежности системы является уменьшение числа элементов в ней за счет использования комбинированной обработки, а также определения наименее надежных элементов и замены их новыми.

В связи с тем, что технологические дефекты могут передаваться с одной операции на последующую, необходимо составление маршрутов изготовления изделия не только с позиций производительности или существующей компоновки оборудования в цехе, но и с позиций технологической наследственности. Причем может быть реализована как отрицательная технологическая наследственность, так и положительная. Например, нарушение точности обработки центровых отверстий ступенчатого вала приведет к возникновению погрешности обработки при последующей его обточке в жестких центрах многорезцового полуавтомата (отрицательная наследственность). С другой стороны в технологии изготовления шасси из высокопрочной стали, предусмотрено число операций в 3...4 раза больше, чем при изготовлении шасси из средне-прочной стали типа 30ХГСА. Число операций увеличено в основном за счет промежуточных операций, направленных на повышение надежности изделия трех- и четырехкратные низкотемпературные отжиги и упрочнения (устранение отрицательной наследственности).

Финишные операции оказывают более сильное влияние на параметры качества, чем промежуточные операции. Например, точность обработки по диаметру отверстия при сверлении и зенкеровании полностью определяется финишной операцией (зенкерованием). Чем ближе технологическая операция к финишной, тем больше её влияние на выходные параметры изделия. Исключение составляют обычно операции, изменяющие характеристики самого материала детали.

Решающее влияние на надежность технологических систем оказывает автоматизация технологического процесса и уменьшение

или исключение ручных операций не столько из-за исключения случаев нарушения технологического регламента, но в основном из-за снижения дисперсии параметров качества.

В ряде случаев, особенно при освоении новых образцов изделий, отказы, связанные с технологией, возникают потому, что её уровень не соответствует возросшим требованиям к изделию, не создан запас надежности технологической системы и параметры технологического процесса близки к предельным. Средства технологического оснащения, методы контроля, организация технологического процесса уже перестают удовлетворять требованиям, предъявляемым для изготовления изделий с более высокими показателями качества. Существует устойчивая тенденция развития современных технологий, связанная с повышением прецизионности процесса, развитием различных методов упрочняющих технологий и технологий нанесения покрытий, развитием сверхчистых и однородных материалов или материалов с ультрамелким размером зерна.

В тех отраслях промышленности, к изделиям которых предъявляются повышенные требования, особое внимание при внедрении новых процессов уделяется их надежности. Так, применение точных отливок в авиационной промышленности привело к необходимости введения таких мероприятий, как строгая приемка материалов, повышение точности прессформ, создание более совершенных технологий монтажа изделий, тщательный контроль шихты, плавки, заливки, очистки отливок, их термообработки, механических испытаний образцов, вырезанных из отливок, систематическая аттестация контрольно-измерительной аппаратуры и др.

Основные направления повышения надежности летательных аппаратов совершенствованием технологических систем их производства, испытания и контроля.

Изделия аэрокосмической техники характеризуются непрерывным ростом не только летно-технических и экономических показателей, но и в значительной мере ростом их показателей надежности. Обеспечение высокой надежности ЛА осуществляется на этапе их производства и невозможно без высокой надежности технологических систем.

До определенного этапа развития аэрокосмической техники основным методом получения изделий высокого качества было постоянное обнаружение и исправление возникших дефектов. При такой организации производства считалось, что получение некоторого процента дефектных деталей в серийном производстве является неотъемлемым свойством технологического процесса.

Однако, качество изделия создается не в процессе контроля или испытаний, а в процессе производства. Поэтому основой должен быть анализ объективных и субъективных причин возникновения дефекта, с тем чтобы субъективные причины исключить, а отрицательное влияние объективных

факторов научиться измерять количественно и ограничивать до нужных пределов. В этом заключается суть систем бездефектного изготовления продукции.

В настоящее время российская аэрокосмическая промышленность все более активно выходит на международный рынок. В связи с этим возникает необходимость не только обеспечения показателей качества продаваемой продукции, но и создание уверенности у потребителя в том, что поставщик способен обеспечить стабильность этого качества в соответствии с контрактом. Гарантией стабильности качества продукции является наличие на производстве сертифицированной независимым международным органом системы качества продукции. Одной из составляющих системы качества является комплексная система технологического обеспечения надежности летательных аппаратов. В зависимости от вида изделия, традиций КБ-разработчика изделия и конкретного завода-изготовителя системы технологического обеспечения надежности и качества имеют некоторые отличия. Однако их общую сущность можно представить в виде системы, изображенной на рис.12.18.

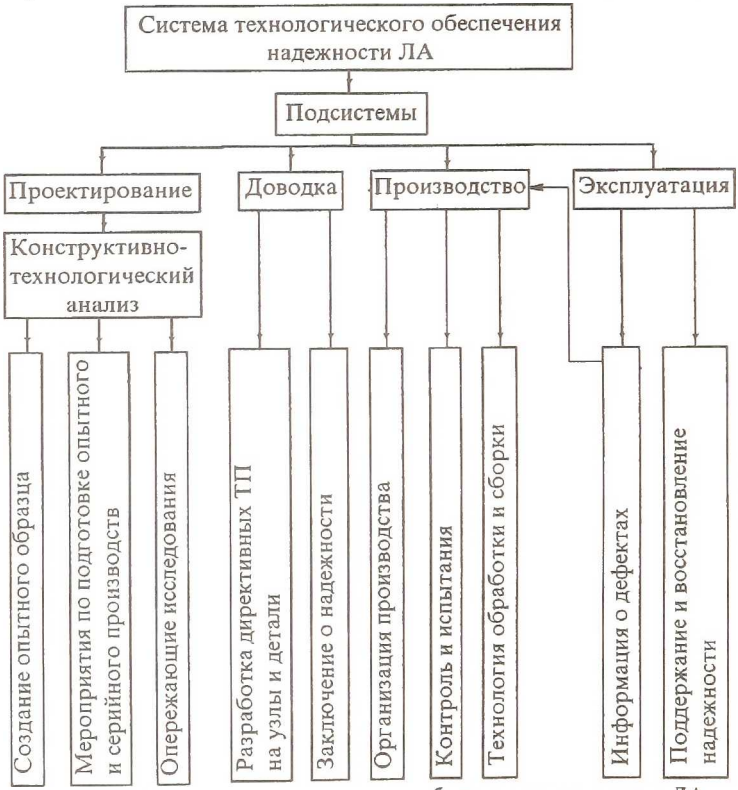


Рис.12.18. Система технологического обеспечения надежности ЛА

Технологическое обеспечение качества и надежности ЛА начинается с этапа конструкторско-технологического анализа изделия (подсистема "Проектирование. Конструкторско-технологический анализ"), отрабатывается в результате доводки изделия (подсистема "Доводка"), реализуется на этапе производства (подсистема "Производство") и совершенствуется по результатам эксплуатации изделия (подсистема "Эксплуатация").Некоторые элементы этих подсистем изображены на рис.12.19, рис.12.20.

Рис.12.19. Элементы подсистем "Проектирование" и "Доводка"

Основными этапами работ в подсистеме "Проектирование. Конструкторско-технологический анализ" является проведение

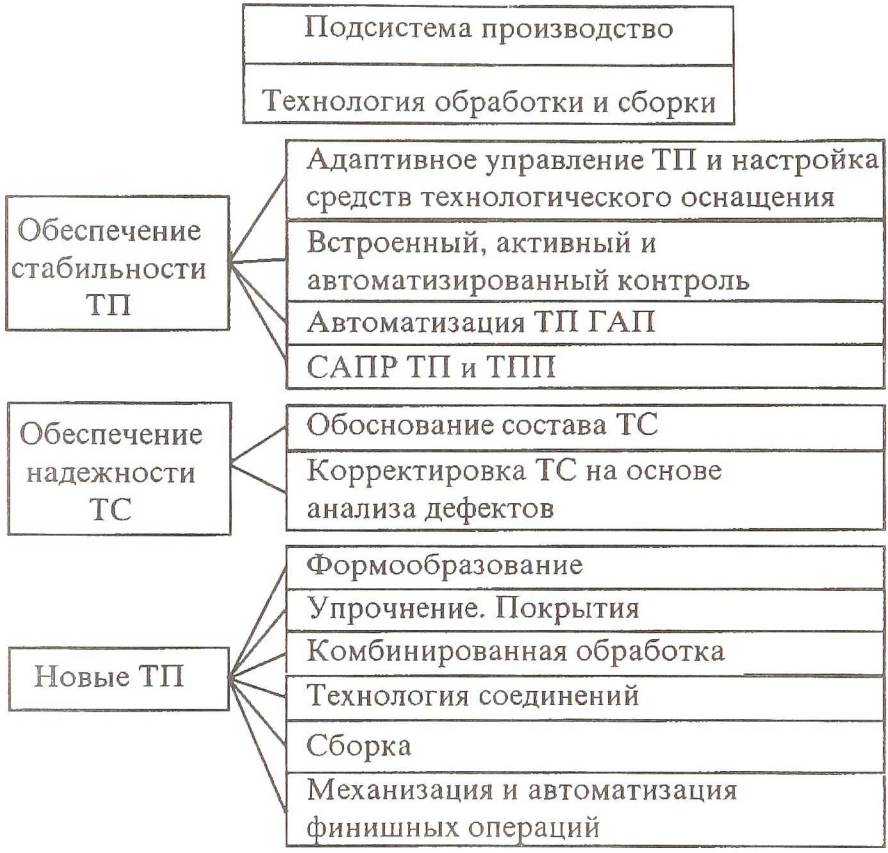


Рис.12.20. Элементы подсистемы "Производство"

опережающих исследований, разработка мероприятий по подготовке опытного и серийного производства и создание опытного образца изделия (см. рис.12.19). На этапе опережающих исследований проводится конструкторско-технологическая оптимизация элементов конструкции, узлов, агрегатов и т.д. на надежность, разрабатываются технологические процессы обработки материалов и сборки изделия. Особенно важным на данном этапе является выяснение влияния выбранных технологических процессов на надежность элементов изделия, особенно в случае использования новых материалов и новых технологий. Как уже отмечалось, свойства материалов для элементов конструкции нельзя рассматривать изолированно, без учета влияния на эти свойства условий и режимов обработки и сборки, а также последующих условий их эксплуатации. Известно, что воздействие конструктивных концентраторов напряжений в деталях в виде галтелей, резьбовых и сварных соединениях, воздействие повышенных темпе-

ратур и коррозионных сред приводит к тому, что допускаемые эксплуатационные напряжения в реальных деталях не превышают 10...70% предела усталости стандартных образцов по ГОСТу из этих материалов. Кроме этого существует дисперсия механических свойств поставляемых материалов, дисперсия режимов обработки и точности настройки. Отсюда появляется дисперсия параметров качества деталей. Очень часто эта дисперсия наиболее явно проявляется в свойствах поверхностного слоя, который наиболее сильно влияет на основные эксплуатационные показатели изделия. Например, изменение условий обработки изменяет дисперсию этих свойств в 3...4 раза и уменьшает математическое ожидание параметров качества, а следовательно, уменьшает вероятность безотказной работы детали и изделия в целом. В связи с этим важным направлением уменьшения дисперсии из-за технологических факторов является использование адаптивного управления технологическими процессами и введение специальных операций модифицирования поверхностного слоя.

В настоящее время поверхностное упрочнение и упрочняющие покрытия являются одной из обязательных финишных операций при изготовлении ответственных деталей. В случае обеспечения стабильности во времени и по всей площади детали обработка поверхностным пластическим деформированием (ППД) обеспечивает повышение надежности технологических систем как за счет увеличения номинальных значений параметра качества, так и снижения его дисперсии. ППД по сравнению с другими методами обработки в 2...4 раза уменьшает доверительный интервал на сжимающие остаточные напряжения в приповерхностном слое (при доверительной вероятности 0,95) и до 40% увеличивает однородность других свойств поверхностного слоя.

Одним из основных направлений является также повышение технологичности конструкций, особенно для проведения сборочно-монтажных работ. Это в основном достигается панелированием и агрегатированием монтажей. Конечной целью всех этих мероприятий является разработка наиболее полных и обоснованных ТУ на параметры качества изделия, на параметры технологических систем и методы испытания и контроля (см. рис.12.13, 12.14).

Одним из наиболее важных и эффективных средств обеспечения объективности перечисленных мероприятий являются испытания, которые проводятся на всех этапах, начиная с проектирования изделия, и продолжаются на этапе серийного производства и эксплуатации в виде сбора информации для уточнения поведения материалов и конструкций в реальных условиях эксплуатации.

Испытания образцов подразделяют на лабораторные (стендовые), проводимые на месте изготовления изделия, и летные испытания, проводимые на ЛА.

Лабораторные испытания опытных образцов дают первичную информацию о работе деталей, узлов, устройств при воздействии на них различных факторов. Однако при лабораторных (стендовых) испытаниях нельзя учесть всего разнообразия факторов, имею-щих место при эксплуатации опытных образцов на ЛА различных классов. Для одного и того же агрегата характер нагрузок, уровни, последовательность и цикличность их действия может изменяться в зависимости от типа ЛА. Поэтому, как показывает опыт, характеристики надежности, полученные при лабораторных испытаниях, значительно отличаются как по уровню, так и по характеру отказов. В связи с этим кроме лабораторных испытаний проводится большой объем летных испытаний, в том числе и испытания материалов узлов в условиях экспонирования в открытом космическом пространстве.

В связи с тем, что подвергать испытаниям, как правило, можно ограниченное число деталей, агрегатов, систем и изделий, проводят либо форсированные испытания, либо испытания с увеличенной длительностью. В разделе "Ускоренные испытания" (п.12.4) было показано, что, например, введение коэффициента форсирования $\eta_{\phi}=2$ для пирозамка ракетоносителя на 10 образцах можно получить нижнюю границу вероятности безотказной работы пирозамка $P_{H,H}=1-10^{-18}$ при $\gamma = 0{,}95$. Если бы испытания не форсировались, то для подтверждения этого уровня надежности требовалось бы испытать $3\cdot10^{18}$ пирозамков.

Для вновь проектируемых самолетов изготавливают как минимум три комплекта агрегатов: для полноразмерного стенда, для полных изолированных испытаний и для установки на самолет. Первый вылет самолета с этими агрегатами возможен после положительных испытаний первых двух комплектов (рис.12.21).

Самолет запускается в серийное производство, если стендовыми испытаниями узлов на предельных режимах установлена их безотказность и, кроме того, если лидерные самолеты (обычно 2 или 3 экземпляра) налетали без отказа по тройному ресурсу. Как показано в разделе "Ускоренные испытания" (п.12.4), испытания трех экземпляров по тройному ресурсу позволяет подтвердить нижнюю границу вероятности безотказной работы $P_{H,H}=0{,}9986$ при $\gamma=0{,}9$. Проведение же испытаний по обычной схеме потребовало 1645 экземпляров самолетов для подтверждения этого уровня их надежности.

Технологическая подготовка производства и затем изготовление опытного образца (см. рис.12.19) обеспечивают комплексное решение задач как по созданию технологической системы изготовления изделия на основе ранее разработанных ТУ, так и создание об-

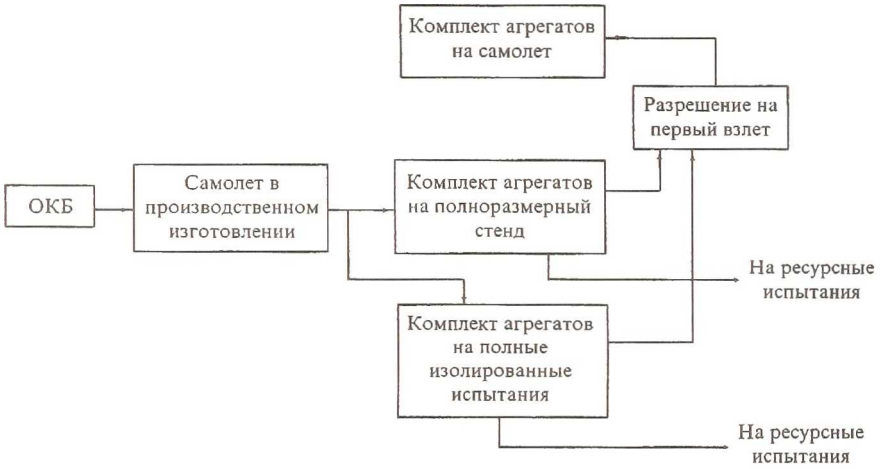


Рис.12.21. Типовая схема объема и последовательности испытаний агрегатов самолета

разцов продукции и на основе результатов её испытания, проведения дальнейшей доработки по надежности изделия и технологической системы. Повышение надежности технологической системы производства, также как и надежности летательных аппаратов, обеспечивается главным образом комплексной, многостадийной и длительной по времени доводкой технологической системы по результатам испытаний деталей и узлов, а затем испытаний и эксплуатации изделия.

Состав технологической системы назначается в соответствии с характером выполняемых технологических операций и заданных ТУ. Характеристики технологической системы определяются на основе известных аналогов и нормативно-технической документации. Из всей совокупности технологической системы выделяются её характеристики, которые влияют на выполнение конкретных требований ТУ Затем эту группу характеристик подразделяют на группу качественных и группу количественных характеристик. Из группы качественных характеристик выделяют исполнительные характеристики, а из группы количественных характеристик выделяют исполнительные параметры.

Технические условия на технологическую систему (см. рис.12.13), конструкторская и нормативная документация должны содержать информацию на предельные требования (возможности) каждой исполнительной характеристики и задавать предельные значения исполнительного параметра в виде допуска $\Delta Д$, за пределами которого возможен технологический дефект. При этом разработка конструкторской и нормативной документации и ТУ на технологические системы предполагает совместную многостадийную работу конструкторов и технологов по трем основным направлениям:

1) повышенных требований к исполнительным характеристикам относительно предельных требований к элементам конструкций, для создания оптимального запаса надежности технологических систем (см. рис.12.13, 12.14);
2) установление расчетных требований к количественным характеристикам элементов технологической системы;
3) исключение недопустимого уровня отрицательной технологической наследственности.

Расчетные требования и количественные характеристики технологической системы могут устанавливаться на основе того факта, что выход годной продукции зависит от соотношения суммарной погрешности технологической системы и допуска на данный параметр качества (12.84), (12.85) и (12.99) через квантиль вероятности выполнения задания по параметру (в данном случае он определит вероятность выхода годной продукции). Например, при нормальном законе вероятность выхода годной продукции будет зависеть от $U_p=\Delta Д/\sigma_{T.C}$ ($\Delta Д$ допуск на исполнительный параметр; $\sigma_{T.C}$ общая погрешность технологической системы) в соответствии с приведенными данными.

$\Delta Д/\sigma_{T.C}$....	1	2	3	4	5	6
P	0,3830	0,6826	0,8664	0,9544	0,9876	0,9974

При этом считается, что верхняя граница доли дефектной продукции в 0,3% при выборе технологической системы с $\sigma_{T.C}=\Delta Д/6$ гарантирует высокую надежность технологической системы (вероятность выполнения задания 0,9974) с учетом операций контроля и отбраковки продукции. Так как процесс отбраковки носит также вероятностный характер (см. рис.12.10), то риски поставщика и потребителя будут определяться отношением σ_k дисперсии системы контроля к значениюконтролируемого допуска $\Delta Д$ (ГОСТ 8051-81).

Таким образом, при технологической подготовке производства и выпуске опытного образца должны быть решены вопросы выбора оптимальных технологических процессов, режимов технологических операций и методов и мест контроля, а также выбора оптимального состава технологической системы по надежности.

В случае серийного производства ЛА работы по созданию изделия не ограничиваются выполнением проектных работ, постройкой опытных образцов, проведением лабораторных и летных испытаний. Продолжением процесса проектирования с учетом требований серийного производства и эксплуатации является конструкторско-технологическая доводка. Необходимость этапа доводки вызывается спецификой опытного производства и его отличием от серийного.

В процессе опытного производства в первую очередь решаются вопросы обеспечения необходимых тактико-технических данных ЛА. К моменту окончания летных испытаний вносится достаточно большое число конструктивных изменений в изделие. Необходимость этих изменений становится обычно ясна только к концу испытаний и анализа полученных данных. Поэтому в процессе запуска изделия в серийное производство производится конструктивно-технологическая доводка.

Особую важность доводка изделия на стадии серийного производства приобретает в связи с тем, что оборудование серийного и опытно-экспериментального заводов или технологической базы ОКБ имеют различие как по номенклатуре, так и степени изнашивания, отличается также квалификация технического персонала этих подразделений.

Процесс конструктивно-технологической доводки и подготовки серийного производства максимально используется для повышения показателей надежности изделия и корректировки директивных технологических процессов (см. рис.12.19).

Повышение надежности ЛА на этом этапе достигается в результате значительного улучшения его производственной, эксплуатационной, а для ремонтируемых изделий и ремонтной технологичности, продолжения и расширения объема начатых ранее ресурсных испытаний, уточнения технических условий и программ испытания готовых изделий. В этот период решаются многие вопросы рационального размещения оборудования, коммуникаций и увязки с элементами конструкции аппарата. Параллельно с плазовыми работами ведется разработка технологии монтажных работ. При этом необходимо обращать внимание на выбор баз, относительно которых должны фиксироваться агрегаты силовой установки, систем управления, топливной и гидросистем, связанные трубопроводами.

Окончательную отработку сложных пространственных систем целесообразно проводить на макете летательного аппарата. Это позволяет изыскать еще более простые решения компоновки агрегатов, монтажа элементов коммуникаций, сократить число соединений и повысить эксплуатационные качества изделий. По мере отработки монтажей должны быть изготовлены эталоны всех элементов систем. Эти детали в дальнейшем используются при изготовлении всей заготовительной, монтажной и контрольной оснастки.

На стадии серийного производства технологическая надежность ЛА обеспечивается стабильностью технологического процесса, надежностью технологических систем и введением новых технологических процессов, позволяющих снижать дисперсию и повышать номинальные значения показателей качества продукции (см. рис.12.20).

Обеспечение надежности технологических систем реализуется за счет выявления технологических дефектов и обоснованной корректировки технологических систем. Стабильность же технологических процессов обеспечивается их адаптивным управлением и адаптивной настройкой средств технологического оснащения, использованием автоматизации и гибких автоматизированных производств, применением САПР ТП и ТПП, а также использованием активного и автоматизированного контроля как параметров качества продукции, так и параметров технологических систем. Важнейшим направлением повышения стабильности производств является уменьшение доли ручных работ, особенно на стадии финишных операций.

Например, при сборке резьбовых соединений разброс силы затяжки составляет: при затяжке динамометрическим ключом 25...30%; при затяжке на определенный угол поворота гайки 15%; при контроле затяжки по деформации тарированной упругой шайбы 10%; при контроле удлинения болта 3...5%. Этим разбросам силы затяжки соответствуют приблизительно следующие значения коэффициентов вариации силы затяжки: 0,1; 0,06; 0,04; 0,02. Т.е. субъективный фактор и выбранные средства технологического оснащения могут изменить коэффициент вариации в 5 раз. Вероятность же безотказной работы такого соединения по критерию нераскрытия стыка соответствует вероятности того, что наименьшее напряжение в стыке после приложения внешней нагрузки больше нуля. Для простейшего случая, когда единичное болтовое соединение нагружено внешней центральной отрывающей силой F (случайная величина), эта вероятность будет определяться из условия [60]:

$$P_\delta = P(F_з/\beta_c > F(1-\chi)), \qquad (12.105)$$

где $P_з$ сила затяжки; $1-\chi$ множитель, характеризующий долю внешней нагрузки на стык; β_c коэффициент, учитывающий возможное ослабление затяжки вследствие обмятия стыков.

Для случая нормального распределения эта вероятность определяется значением квантиля распределения (12.51), где n коэффициент запаса надежности по нераскрытию стыка, $n=m_з/\beta_c m(1-\chi)$; $m_з$, $\nu_з$, m, ν математические ожидания и коэффициенты вариации $F_з$, F соответственно.

Например, пусть затяжка осуществляется в первом случае динамометрическим ключом $\nu_{з.1}=0{,}1$, а во втором случае при контроле удлинения болта $\nu_{з.1}=0{,}02$. Коэффициент вариации внешней силы $\nu=0{,}1$ и коэффициент запаса надежности стыка $n=1{,}4$. Подставляя эти данные в (12.51) и используя таблицы нормального распределения, получим: $U_{p.1}=-2{,}35$ и $P_{\delta.1}=0{,}992$; $U_{p.2}=-4$ и $U_{\delta.2}=0{,}99999$. Таким образом, в первом случае произошла значительная потеря в вероятности нераскрытия стыка. Учитывая, что эта вероятность должна быть умножена на вероятность по критерию несдвигаемости стыка

(имеет такой же порядок), по критерию статистической прочности и критерию сопротивления усталости можно получить, что операция затяжки динамометрическим ключом в ряде случаев приведет к дефекту изделия из-за исчерпания запаса надежности технологической системы данной операции.

Большое влияние на надежность ЛА оказывают сварные соединения, особенно по критерию выносливости. Однако технология выполнения сварных соединений и существующие средства технологического оснащения часто дают значительное рассеяние предела выносливости. Это связано с рядом причин.

В стыковых соединениях рассеяние предела выносливости только от разброса угла шва достигает 30% для ручной сварки и 20% для автоматической. Сварка лобовыми швами соединения внахлестку дает рассеяние предела выносливости до 35% из-за разброса катетов шва. В тавровых соединениях рассеяние предела выносливости колеблется от 16 до 30% из-за рассеяния эффективного коэффициента концентрации напряжений внутри стыка соединения. Сварные коробчатые балки характеризуются большим числом швов и непостоянством провара вследствие одностороннего шва, что приводит к рассеянию в пределах 30...40%. Таким образом, коэффициент вариации предела выносливости сварных соединений по указанным причинам может изменяться в пределах от 0,1 до 0,03. Причем максимальные значения соответствуют ручным видам сварки.

Квантиль нормального распределения для вероятности неразрушения шва из-за усталости имеет вид, аналогичный (12.52), где $\nu_з$ - коэффициент вариации предела выносливости сварной детали, ν коэффициент вариации внешней нагрузки; n коэффициент запаса надежности шва. Коэффициент вариации предела выносливости шва следует рассчитывать на основе соотношения (12.85):

$$\nu_з = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \nu_i^2} ,$$

где ν_1 коэффициент вариации предела выносливости материала одной плавки без сварного шва (порядка 0,04...0,06); ν_2 коэффициент вариации среднего предела выносливости материала по плавкам (порядка 0,06...0,08); ν_3 коэффициент вариации предела выносливости в зависимости от состояния свариваемых поверхностей (метод обработки материала под шов, вид материала, наличие окислов и окалины и т.д.), который может изменяться в пределах от 0,02 до 0,1; ν_4 - коэффициент вариации предела выносливости сварного соединения при испытаниях на образцах по ГОСТу (порядок от 0,1 до 0,03); ν_5 коэффициент вариации выносливости свариваемых деталей (рассеяния из-за технологии изготовления деталей под сварку).

Таким образом, коэффициент вариации сварного соединения в зависимости от технологии его изготовления может изменяться в пределах от 0,08 до 0,23, т.е. изменяя квантиль распределения в 3 раза. Для обеспечения нужной вероятности неразрушения шва и компенсации изменения коэффициента вариации возникает необходимость закладывать повышенные значения коэффициента запаса надежности. Данный расчет предполагает качественное выполнение шва и отсутствие в нем поверхностных и объемных дефектов типа кратеров, подрезов, шлаковых включений и т.д. Отсутствие таких дефектов обеспечивается контролем подготовительных операций, режимов сварки и применением послеоперационного контроля.

Большое влияние на стадии серийного производства на надежность изделия оказывает дальнейшая стабилизация и повышение надежности финишных технологических процессов, особенно оказывающих влияние на свойства приповерхностного слоя детали.

В процессе подготовки производства и в ходе серийного производства продолжаются лабораторные испытания и испытания деталей, агрегатов и систем изделия. Это связано с тем, что в процессе летных испытаний и конструктивно-технологической доводки вносится целый ряд конструктивных и технологических изменений, которые требуют лабораторной проверки. Кроме того, проведение исследований и испытаний необходимо для выявления причин отказов в процессе серийного производства и эксплуатации первых партий серийных изделий.

Надежность ЛА не может быть обеспечена без глубокого опыта эксплуатации и фактического анализа надежности изделия при эксплуатации. Ценными являются сведения по отказам изделий, полученных в процессе испытаний на серийном заводе и дальнейшей эксплуатации. Поэтому эти данные подвергаются тщательному анализу с применением статистических методов (п.12.4), с тем чтобы выявить закономерности отказов, их вероятности распределения в зависимости от различных факторов, получить математические характеристики этих закономерностей, разработать планы и методики контроля.

Обеспечение качества и надежности продукции в процессе её изготовления невозможно без проведения контроля, под которым понимается проверка соответствия продукции или процесса установленным техническим требованиям. Поэтому контроль может относиться как к проверке качественных и количественных характеристик свойств продукции, так и к контролю режимов, характеристик и параметров технологического процесса. Контроль продукции может осуществляться её испытанием, под которым понимают экспериментальное определение характеристик изделия, проводимое по специально разработанному плану (п.12.4).

Методика контроля разрабатывается таким образом, чтобы необходимыми техническими средствами были охвачены все стадии производства и испытаний. Средства контроля должны применяться при входном контроле на каждой операции и на всех стадиях технологического процесса изготовления и испытаний деталей и узлов, а также для настройки и оценки средств технологического оснащения.

Однако оценка уровня качества продукции - необходимый, но не достаточный вид статистического контроля для обеспечения высокой надежности и стабильности технологических систем.

Статистические методы контроля должны применяться и для контроля параметров технологических систем. Принципиальная разница между контролем качества продукции и контролем параметров технологических систем заключается в том, что при контроле продукции в основном создаются условия, исключающие поставку дефектной продукции, а при контроле технологических систем создаются предпосылки для неизготовления дефективной продукции. Действительно, при контроле технологических систем появляется возможность определения тенденций изменения характеристик системы и путем её подналадки принятия мер для предотвращения возникновения дефекта, т.е. создать условия для бездефектного изготовления продукции.

Особенно широкие возможности управления качеством продукции имеют место при автоматизации контроля и применения методов активного контроля. Активный контроль, при котором по результатам контроля дается команда на подналадку оборудования, изменения режимов его работы или даже на остановку технологического процесса, совместно с системами автоматизированной поднастройки дает гарантию обеспечения стабильности и надежности технологических систем, а следовательно, гарантию обеспечения качества и надежности изделия.

Список литературы

1. Александров Е.В., Сокольский В.В. Прикладная теория и расчеты ударных систем. М.: Наука, 1968. 201 с.
2. Барвинок В.А., Чекморев А.Н., Ермолов О.А. Управление качеством путем построение оптимального уровня производства изделий// Проблемы машиностроения и автоматизации, 1995, №5-6. С.3-5.
3. Барвинок В.А. Математическая статистика в производстве летательных аппаратов: Учеб.пособие. Куйбышев: КуАИ, 1984. 64 с.
4. Барвинок В.А., Пытьев П.Я., Корнев Е.П. Основы технологии в производстве летательных аппаратов: Учебник. М.: Машиностроение, 1995. 398 с.
5. Барвинок В.А., Чижов А.А., Родин Н.П., Потяев Е.И., Аноприенко Г.М. Основные технологические процессы общей сборки в производстве летательных аппаратов: Учеб.пособие. Самара: СГАУ, 1993. 83 с.
6. Барвинок В.А., Горячев А.С., Богданович В.И., Докукина И.А. Теплоизоляционные и теплозащитные покрытия в производстве летательных аппаратов: Учеб.пособие. Самара: СГАУ, 1994. 68 с.
7. Барвинок В.А., Бордаков П.А. Математическое планирование эксперимента в производстве летательных аппаратов: Учеб.пособие. Куйбышев: КуАИ, 1990. 64 с.
8. Барвинок В.А., Вашуков Ю.А., Богданович В.И. Определение усилия осадки и деформации втулки при подкреплении отверстия в деталях из композиционных материалов// Кузнечно-штамповочное производство. 1990. №7. С.14-16.
9. Барвинок В.А., Горячев А.С., Федотов Ю.А. Методы и средства монтажа и испытаний баков-емкостей в производстве летательных аппаратов: Учеб.пособие. Куйбышев: КуАИ, 1988. С.68.
10. Барвинок В.А. Оптимизация технологических процессов плазменного и ионно-плазменного напыления на детали летательных аппаратов и двигателей// Изв.ВУЗОВ: Авиационная техника, 1993. №2. С.79-83.
11. Барвинок В.А., Лычов П.В. К вопросу синтеза технологических модулей математического обеспечения САПР-ТП холодной штамповки// Изв.ВУЗОВ: Машиностроение, 1989. №5. С.116-123.
12. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. М.: Машиностроение, 1990. 386 с.
13. Белоглазов И.М., Звягинцев В.А., Лысенко Ю.Д., Пешков Б.П., Щербатых В.В. Технология сборки, монтажа и испытаний летательных аппаратов: Учеб.пособие. Самара: СГАУ, 1993. 75 с.
14. Богданович В.И., Барвинок В.А., Цидулко А.Г. Системный анализ технологических методов обработки в производстве летательных аппаратов: Учеб.пособие. Куйбышев: КуАИ, 1989. 68 с.
15. Бойцов В.В. и др. Сборка агрегатов самолета: Учеб.пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Самолетостроение"/ Бойцов В.В., Ганиханов Ш.Ф., Крысин В.Н. М.:Машиностроение, 1988. 152 с.
16. Бордаков П.А. Планирование эксперимента в технологических исследованиях производства летательных аппаратов: Учеб.пособие. Куйбышев: КуАИ, 1986. 38 с.
17. Брагин В.А., Турьян В.А. Производство самолетов. М.:Машиностроение, 1967. 318 с.
18. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 400 с.
19. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и её инженерное приложение. М.: Наука, 1988. 480 с.
20. Вигдорчик С.А. Технологические основы проектирования и конструирования самолетов: Конспект лекций. Часть II. М.: МАИ, ротапринт, 1976. 96 с.
21. Волокнистые композиционные материалы с металлической матрицей/ М.Х.Шоршоров, А.И.Колпашников, В.И.Костиков и др./ Под ред. М.Х.Шоршорова. М.:Машиностроение, 1981. 272 с.
22. Волошин И.Н. Обеспечение точности обводов клепаных агрегатов самолетов. М.:Машиностроение, 1979. 152 с.

23. Гернет М.М., Ратобыльский В.Ф. Определение моментов инерции. М.:Машиностроение, 1969. 150 с.
24. Горячев А.С. Балансировка агрегатов летательных аппаратов: Учеб.пособие. Куйбышев: КуАИ, 1982. 70 с.
25. Горячев А.С., Белоглазов И.М., Лысенко Д.Н. Сборка клепаных узлов и агрегатов летательных аппаратов: Учеб.пособие. Куйбышев: КуАИ, 1986. 72 с.
26. Горячев А.С. Контроль герметических параметров агрегатов летательных аппаратов: Учеб.пособие. Куйбышев: КуАИ, 1989. 84 с.
27. Григорьев В.П. Взаимозаменяемость агрегатов в самолетостроении. М.:Машиностроение, 1969. 258 с.
28. Григорьев В.П., Ганиханов Ш.Ф. Приспособления на сборки узлов и агрегатов самолетов и вертолетов: Учеб.пособие для авиационных вузов. М.:Машиностроение, 1977. 140 с.
29. Григорьев В.П. Сборка клепаных агрегатов самолетов и вертолетов: Учеб.пособие. М.:Машиностроение, 1975. 344 с.
30. Гришин И.С. Диффузионная сварка жаропрочных сплавов между собой и с конструкционными сталями: Конспект лекций. Куйбышев: КуАИ, 1981. 35 с.
31. Джур Е.А., Вдовин С.И., Кучма Л.Д., Найденов Е.Ю., Ухов Е.И. Технология производства космических ракет: Учебник. Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1992. 184 с.
32. Докунина Н.А. Методы и средства контроля герметических параметров в самолетостроении. М.: Оборонгиз, 1959. 130 с.
33. Дударь Л.А. Деформации и напряжения, возникающие при сварке узлов летательных аппаратов: Учеб.пособие. Самара: СГАУ, 1992. 87 с.
34. Дударь Л.А. Особенности сварки плавлением алюминиевых сплавов, используемых в производстве летательных аппаратов: Консп. лекций. Куйбышев: КуАИ, 1985. 54 с.
35. Золотов А.А., Титов М.И. Обеспечение надежности транспортных аппаратов космических систем. М.:Машиностроение, 1988. 216 с.
36. Камалов В.С. Производство космических аппаратов. М.:Машиностроение, 1982. 280 с.
37. Киселев И.М. Определение положения центра тяжести летательных аппаратов. М.: МАИ, 1974. 234 с.
38. Козий С.И., Желтов И.Н. Разделительные операции при обработке волокнистых композиционных материалов: Учеб.пособие. Куйбышев: КуАИ, 1986. 68 с.
39. Композиционные материалы: В 8-ми томах. Т.4. Композиционные материалы с металлической матрицей. Пер. с англ./ Под ред. К.Крейдера. М.: Машиностроение, 1978. 504 с.
40. Композиционные материалы: Справочник/ В.В.Васильев, В.Д.Протасов, В.В.Болотин и др./ Под общ. ред. В.В.Васильева, Ю.М.Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
41. Конструирование автоматических космических аппаратов/ Д.И.Козлов, Г.П.Аншаков, В.Ф.Агарков и др./ Под ред. Д.И.Козлова. М.: Машиностроение, 1996. 448 с.
42. Кочергин К.А. Контактная сварка. Л.: Машиностроение, 1987. 240 с.
43. Крысин В.Н., Крысин М.В. Технологические процессы формования, намотки и склеивания конструкций. М.: Машиностроение, 1989. 240 с.
44. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1976. 216 с.
45. Ланис В.А., Левина Л.Е. Техника вакуумных испытаний. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 137 с.
46. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
47. Лысенко Ю.Д., Звягинцев В.А., Пешков Б.П. Механизация и автоматизация клепально-сборочных работ на базе импульсных машин: Учеб.пособие. Куйбышев: КуАИ, 1991. 54 с.
48. Надежность технических систем: Справочник/ Ю.К.Беляев, В.А.Богатырев, В.В.Болотин и др./ Под ред. И.А.Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.

49. Никольский А.А. Вопросы расчета на точность и жесткость сборочных приспособлений в самолетостроении. М.: МАТИ, 1962. 86 с.
50. Никольский А.А. Экономическое обоснование выбора оптимального варианта технологических процессов. М.: МАТИ. 1959. 84 с.
51. Оснащение самолетного и ракетного производства (Пер. с англ.)/ Под ред. С.А.Вигдорчика. М.: Машиностроение, 1967. 404 с.
52. Основы конструирования ракет-носителей космических аппаратов: Учебник для студентов ВТУЗОВ/ В.И.Жихорев и др./ Под ред. В.П.Мишина, В.К.Корраска. М.: Машиностроение, 1991. 416 с.
53. Павлов В.В. Основы автоматизированного проектирования технологических процессов сборки летательных аппаратов. М.: МАТИ, 1975. 70 с.
54. Панкратов Б.М. Спускаемые аппараты. М.: Машиностроение, 1984. 232 с.
55. Пац И.Н., Жоголь В.Д., Абрамов И.А. Оборудование сборочно-испытательного производства. Л.: Машиностроение, 1976. 120 с.
56. Перельман Р.Г., Денисов Ю.Д. Прочность металлов при капельно-ударном воздействии// Проблемы прочности. №10. 1971. С.20-26.
57. Проников А.С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.
58. Ракеты-носители/ В.А.Александров / Под общ.ред. С.О.Осипова. М.: Воениздат, 1981. 315 с.
59. Расчет сварных соединений на прочность. Контроль качества сварных соединений/ В.М.Качалов, А.Н.Трофимов/ Под ред.Ф.В.Шубина. М.: МЭИ, 1992. 68 с.
60. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин. М.: Высшая школа, 1988. 237 с.
61. Сапожников В.М. Монтаж и испытание гидравлических и пневматических систем на летательных аппаратах.- М.: Машиностроение, 1979.- 256 с.
62. Сварка металлов/ В.В.Новокрещенов/ Под ред.В.М.Качанова. М.: МЭИ, 1993. 100 с.
63. Соломонов П.А. Надежность планера самолета. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.
64. Спиннжер Дж. Эрозия при воздействии капель жидкости (Пер. с англ.)/ Под ред. С.В.Келомей. М.: Машиностроение, 1981. 200 с.
65. Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн. Кн.2/ Под ред. Дж.Любина (Пер. с англ. А.Б.Геллера и др./ Под ред.Б.Э.Геллера. М.: Машиностроение, 1988. 584 с.
66. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. Л.: Машиностроение. 1987. 180 с.
67. Структура и свойства композиционных материалов/ К.И.Портной, С.Е.Салибеков, И.Л.Светлов, В.М.Чубаров. М.: Машиностроение, 1979. 255 с.
68. Тарасевич Р.М. Методы и средства проверки герметичности узлов, отсеков и систем летательных аппаратов. М.: МАИ. 1974. 128 с.
69. Технология производства летательных аппаратов/ Под ред. В.Г.Кононенко. Киев: Вища школа, 1974. 222 с.
70. Технология самолетостроения: Учебник для авиационных вузов/ А.Л.Абибов, Н.М.Бирюков, В.В.Бойцов и др. М.: Машиностроение, 1982. 551 с.
71. Технология сборки и испытаний космических аппаратов: Учебник для высших технических учебных заведений/ И.Т.Беляков, И.А.Зернов, Е.Г.Антонов и др./ Под общ.ред. И.Т.Белякова и И.А.Зернова. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.
72. Технология сборки самолетов: Учебник для студентов авиационных специальностей вузов/ В.И.Ершов, В.В.Павлов, Н.Ф.Каширин, В.С.Хухорев. М.: Машиностроение. 1986. 456 с.
73. Фетисов Г.П. Сварка и пайка в авиационной промышленности: Учеб.пособие для авиационных вузов. М.: Машиностроение, 1983. 216 с.
74. Чернышев А.В. Проектирование стендов для испытания и контроля бортовых систем летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1983. 384 с.
75. Чернышев А.В. Технология монтажа, отработки, испытаний и контроля бортовых систем летательных аппаратов: Учеб.пособие. М.: Машиностроение, 1977. 336 с.
76. Шейнин В.М., Козловский В.И. Весовое проектирование и эффективность пассажирских самолетов. Т.1, 2. М.: Машиностроение, 1977. 265 с.

СОДЕРЖАНИЕ

стр.
Введение 3
1. Значение, характеристика и особенности сборочных, монтажных и испытательных процессов в производстве летательных аппаратов....5
1.1. Особенности производства летательных аппаратов 5
1.2. Общая характеристика сборочных и монтажных работ 7
1.3. Методы сборки и сборочные базы....18
1.4. Виды соединений, применяемых в производстве летательных аппаратов 28
1.5. Расчет процессов сборки на точность 29
1.6. Оценка экономической эффективности процессов сборки 38
1.7. Испытания и контроль в производстве летательных аппаратов 45
2. Сборочно-сварочные работы в производстве летательных аппаратов 53
2.1. Применение сварки в производстве агрегатов летательных аппаратов 53
2.2. Физические основы сварочных процессов. Классификация процессов сварки 58
2.3. Сварка давлением. Особенности формирования соединений при сварке давлением 62
2.4. Основные способы сварки давлением и их применение при изготовлении агрегатов летательных аппаратов 66
2.5. Сварка плавлением. Основные способы сварки и их особенности 91
2.6. Конструктивно-технологические характеристики сварных соединений 114
2.7. Контроль качества сварных соединений 132
2.8. Сборка-сварка герметичных корпусов летательных аппаратов 145
2.9. Сборка-сварка баков-емкостей летательных аппаратов 164
2.10. Сборка-сварка ферменных конструкций 179
3. Сборочно-клепаные и болтовые соединения в производстве летательных аппаратов 184
3.1. Особенности сборки отсеков клепаной конструкции 184
3.2. Общая характеристика технологических процессов клепки и постановки болтов 185
3.3. Процессы образования отверстий и гнезд под головки потайных заклепок 187
3.4. Методы клепки, материалы и типы заклепок 190
3.5. Специальные виды клепки 210

3.6. Болтовые соединения 215
3.7. Комбинированные соединения 219
3.8. Герметизация заклепочных и болтовых соединений 220
3.9. Технологический процесс сборки агрегатов клепаной конструкции 223
3.10. Гибкие клепально-сборочные системы 230
3.11. Контроль качества заклепочных соединений 238
4. Особенности сборки деталей из композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов 240
4.1. Классификация и характеристика композиционных материалов 240
4.2. Применение композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов 248
4.3. Сборка деталей из композиционных материалов 254
4.4. Подготовительные операции перед сборкой 266
4.5. Клепка деталей из композиционных материалов 290
5. Общая сборка летательных аппаратов 308
5.1. Содержание и объем работ общей сборки летательных аппаратов 308
5.2. Организация производства общей сборки ракеты-носителя ...314
5.3. Технические условия на общую сборку 319
5.4. Содержание работ цикла общей сборки ракеты-носителя 326
6. Теплоизоляционные и теплозащитные покрытия в производстве летательных аппаратов 336
6.1. Теплоизоляционные покрытия. Технологические процессы их нанесения 337
6.2. Теплозащитные покрытия. Технологические процессы их нанесения 349
6.3. Контроль качества покрытий 364
7. Балансировка агрегатов летательных аппаратов 370
7.1. Определение положения центра масс изделий (статическая балансировка) 371
7.2. Методы измерения массовых моментов инерции (динамическая балансировка) 392
8. Контроль геометрических параметров летательных аппаратов 404
8.1. Методы определения неплоскостности и непараллельности привалочных плоскостей агрегата 406
8.2. Контроль эксцентриситета, закрутки и искривления оси изделий 410
8.3. Оптико-аналитический метод обмера геометрических параметров изделий 415
8.4. Пример контроля точности секции фюзеляжа с помощью контрольного стенда 417

8.5. Примеры обмера некоторых блоков ракеты-носителя "Молния" 420
8.6. Нивелировочные работы 425
9. Методы испытания баков-емкостей в производстве летательных аппаратов 430
9.1. Система испытаний баков-емкостей летательных аппаратов 430
9.2. Методы испытания емкостей на прочность 432
9.3. Тарировка емкостей 436
9.4. Методы обеспечения чистоты внутренней поверхности баков-емкостей и их элементов 437
9.5. Методы испытания баков-емкостей на герметичность 439
9.6. Техника безопасности при пневмоиспытаниях баков-емкостей 455
10. Контроль и испытания приводных механизмов 457
10.1. Испытание механизмов на срабатывание 457
10.2. Испытания рулевых машинок 461
11. Комплексные испытания на летно-испытательной станции, контрольно-испытательной станции и технологическом комплексе 470
11.1. Летные испытания самолета 470
11.2. Работы, проводимые с космическим аппаратом и ракетой-носителем на контрольно-испытательной станции и технологическом комплексе 473
12. Обеспечение надежности летательных аппаратов в процессе их производства 478
12.1. Надежность как прикладная научная дисциплина и её задачи по обеспечению качества летательных аппаратов....478
12.2. Основные определения и понятия теории надежности 483
12.3. Математические модели отказов технических систем 496
12.4. Организация испытаний и контроля. Оценка показателей надежности по результатам испытаний 517
12.5. Технологическое обеспечение надежности летательных аппаратов 535
Список литературы 570

Учебное издание

Барвинок Виталий Алексеевич, **Богданович** Валерий Иосифович,
Бордаков Павел Александрович, **Пешков** Бронислав Павлович,
Желтов Игорь Николаевич, **Докукина** Ирина Александровна

СБОРОЧНЫЕ, МОНТАЖНЫЕ И ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Лицензия ЛР № 080003 от 12.09.96.
выдана Комитетом Российской Федерации по печати

Редактор *А.И. Баранова*

Сдано в набор 04.11.96.	Подписно в печать 05.11.96.	Формат 60×88 1/16.	
Бумага офсетная.	Гарнитура Таймс.	Печать офсетная.	
Усл.печ.л. 35,28.	Уч.изд.л. 39,21.	Тираж 1000 экз.	Заказ 1682.

Ордена Трудового Красного знамени издательство "Машиностроение",
107076, Москва, Б–76, Стромынский пер., 4

Отпечатано в АООТ "Политех-4",
129110, Москва, Б. Переяславская ул., 46,
с оригинала-макета, изготовленного в Самарском государственном космическом университете