МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Ф. И. ДЕМИН, Н. Д. ПРОНИЧЕВ, И. Л. ШИТАРЕВ

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Утверждено редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» в качестве учебника для студентов, обучающихся по образовательной программе высшего профессионального образования по направлению подготовки бакалавров и магистров «Авиа– и ракетостроение» и направлению подготовки дипломированных специалистов «Двигатели летательных аппаратов».

Под общей редакцией профессора,
доктора технических наук Ф. И. Демина

Второе издание

САМАРА
Издательство СГАУ
2012

УДК 621.45.0.002.2 (0.75.8)
ББК 39.55
Д 30

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В.Н. Трусов,
д-р техн. наук, проф. В.Р. Каргин

Демин Ф.И.

Д30 **Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей** [Электронный ресурс] : [учебник] / *Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев;* под. общ. ред. проф. Ф. И. Демина. – 2-е изд. – Самара: Изд-во СГАУ, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

ISBN 978-5-7883-0912-5

Рассмотрены конструктивные особенности современных газотурбинных двигателей, технические требования, применяемые материалы, способы построения технологических процессов, применяемое оборудование и оснастка. Приведен анализ точности основных качественных показателей исходных заготовок, деталей и применяемых средств производства.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров по авиа– и ракетостроению, а также для дипломированных специалистов по двигателям летательных аппаратов.

УДК 621.45.0.002.2(0.75.8)
ББК 39.55

ISBN 978-5-7883-0912-5

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....**5**
Введение.....**6**
Глава 1. Особенности современных ГТД как объектов производства..... 7
1.1. Основные элементы и параметры ГТД 7
1.2. Особенности и пути совершенствования ГТД.....10
1.3. Технологичность ГТД и его элементов 21
1.4. Направления совершенствования технологических процессов производства деталей и сборочных единиц.....22
Глава 2. Обеспечение показателей качества изделий при изготовлении.....25
2.1. Методы достижения заданной точности показателей качества деталей и сборочных единиц 25
2.2. Технологические условия, необходимые при использовании метода автоматического получения параметров заготовок на настроенном оборудовании.....27
2.3. Структурно-логическая схема обеспечения показателей качества изделий.....33
2.4. Формирование принципиального плана технологического процесса изготовления деталей.....38
Глава 3. Изготовление лопаток.....45
3.1. Конструкция, технические требования и материалы.....45
3.1.1.Замки лопаток.....45
3.1.2. Перо лопаток 50
3.1.3. Бандажные полки 52
3.1.4. Материал лопаток 54
3.2. Технология изготовления лопаток первой ступени турбин 57
3.2.1. Технологический анализ чертежа .детали.....57
3.2.2. Маршрутная технология изготовления лопаток турбины 59
3.2.3. Получение исходной многокристаллической заготовки.....63
3.2.4. Анализ качественных показателей исходной заготовки лопатки.....75
3.2.5. Механическая обработка заготовок.....86
3.2.6. Создание термостойкого покрытия на рабочей поверхности пера лопатки 101
3.3. Технология изготовления лопаток первой ступени компрессора.....107
3.3.1. Технологический анализ чертежа детали, назначение, условия работы и материалы.....107
3.3.2. Маршрутная технология изготовления лопаток.....111
3.3.4. Механическая обработка заготовок.....113
3.3.5. Анализ качественных показателей заготовки после выполнения первой части технологического процесса 121
Глава 4. **Изготовление дисков** 137
4.1. Конструкция, технические требования и материалы.....137
4.2. Технология изготовления дисков первой ступени турбины.....144
4.2.1. Маршрутная технология изготовления дисков.....145
4.2.2. Получение исходной заготовки диска.....145
4.2.3. Механическая обработка дисков.....148

Глава 5. Изготовление валов 173
5.1. Конструкция, технические требования и материалы 173
5.2. Технология изготовления валов 180
5.2.1. Маршрутная технология изготовления валов 184
5.2.2. Получение исходной заготовки вала ротора низкого давления 186
5.2.3. Механическая обработка вала ротора низкого давления 186
5.3. Особенности изготовления валов из низкоуглеродистых легированных сталей 203
Глава 6. Изготовление корпусных деталей 212
6.1. Конструкция, технические требования и материалы 212
6.2. Технология изготовления корпусных деталей 222
6.2.1. Получение исходных заготовок методом литья 222
6.2.2. Получение исходной заготовки корпуса входного направляющего аппарата (ВНА) 229
6.2.3. Маршрутная технология изготовления корпуса ВНА 236
6.2.4. Механическая обработка корпуса ВНА 239
Глава 7. Изготовление зубчатых колес ГТД 251
7.1. Конструкция, технические требования и материалы 251
7.2. Технология изготовления зубчатых колес 255
7.2.1. Общие принципы построения технологических процессов 255
7.2.2. Проектирование технологического процесса 258
7.2.3. Анализ качественных показателей зубчатого колеса 265
7.2.4. Изготовление цилиндрических колес с внутренними зубьями 269
7.2.5. Особенности обработки базовых поверхностей зубчатых колес после термической обработки 271
Глава 8. Композиционные материалы 275
8.1. Виды, свойства и особенности получения композиционных материалов 275
8.2. Полимерные композиционные материалы 280
8.3. Металлические армированные композиционные материалы 282
8.4. Керамические и углеродные композиционные материалы 302
8.5. Проектирование технологического процесса изготовления лопаток из полимерных композиционных материалов 308
8.5.1. Требования к конструкции лопаток из полимерных композиционных материалов 308
8.5.2. Особенности конструкций технологической оснастки 311
8.5.3. Технологический процесс изготовления лопаток из ПКМ 313
Список литературы 318
Приложения 321

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебный курс «Технология деталей летательных аппаратов» состоит из шести разделов:

1) основы проектирования технологических процессов;
2) основы проектирования приспособлений;
3) методы обработки поверхностей;
4) изготовление деталей двигателей;
5) сборка двигателей;
6) автоматизация технологических процессов в авиадвигателестроении.

Предлагаемое учебное пособие охватывает вопросы технологии изготовления основных деталей двигателей современных летательных аппаратов. Представлены современные технологические процессы для основных деталей газотурбинных двигателей; рассмотрены особенности изготовления и дан качественный анализ производства. Вместе с тем опущены вопросы уже известные студентам из пройденных смежных дисциплин и сосредоточено внимание на изготовлении деталей объектов новой авиационной техники.

Материал разделен на восемь глав, в каждой из которых рассмотрены детали, близкие по технологическим признакам. При этом принят следующий порядок изложения:

1) конструкции деталей, технические требования, технологические особенности и применяемые материалы;
2) построение технологического процесса изготовления деталей, обоснование этапов и последовательности обработки;
3) выбор и обоснование исходной заготовки;
4) выполнение основных операций технологического процесса и анализ качественных показателей;
5) комплексный анализ технологического процесса;
6) контроль основных элементов деталей.

Авторы с благодарностью примут все замечания и пожелания читателей, которые просят направлять по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, СГАУ, кафедра «Производство двигателей летательных аппаратов».

ВВЕДЕНИЕ

Производство продукции в машиностроении имеет несколько этапов: предложение, идеи и схемы изделия; оценка его необходимости на рынке и конкурентоспособности; разработка эскизного проекта; предварительные расчеты и проверки; выполнение чертежей конструкции изделия; всесторонний анализ конструкций, расчет выходных качественных показателей; проверка работоспособности; оценка надежности и прочности изделия и его отдельных элементов; проверка условия технологичности конструкции, удобства изделия в эксплуатации, а также другие необходимые работы, связанные с проектированием машиностроительной продукции.

В процессе создания конструкции проектировщики используют имеющийся опыт, существующие средства производства, методы изготовления и контроля отдельных деталей и сборочных единиц. При проектировании изделий учитывают перспективы совершенствования методов и средств производства, появление новых материалов и технологий.

Разработка новых газотурбинных двигателей (ГТД) и освоение их в производстве тесно связаны с особенностями этих высоконагруженных, сложных в конструктивном и технологическом исполнении изделий. Использование легких алюминиевых и магниевых сплавов, высокопрочных легированных сталей и жаростойких хромоникелевых сплавов, использование титановых сплавов, композитных и других материалов требует тщательной оценки экономических показателей производства. Применение современных способов обработки поверхностей заготовок, способов получения исходных заготовок, особенностей изготовления деталей при малых сериях производства определяют существенный характер авиационного двигателестроения.

Эксплуатация ГТД при критических частотах вращения гибких роторов, при высокой температурной нагруженности отдельных элементов конструкции и значительных градиентах температур в различных зонах изделия предъявляют высокие требования к качеству выполнения деталей и сборочных единиц.

ГЛАВА 1.
ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ГТД КАК ОБЪЕКТОВ ПРОИЗВОДСТВА

1.1 ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ПАРАМЕТРЫ ГТД

Газотурбинные двигатели широко используются в авиации. Их можно разделить на следующие группы: турбореактивные (ТРД), турбовинтовые (ТВД) и промежуточные турбореактивные двухконтурные двигатели (ДТРД).

В настоящее время ТРД имеют вполне установившиеся элементы (см. рис. 1.1).

1) входное устройство;
2) компрессор;
3) камеру сгорания;
4) силовой корпус, связывающий турбину и компрессор;
5) турбину;
6) систему выхлопа;
7) корпус приводов агрегатов;
8) топливную, масляную и другие системы и агрегаты.

В ТРД и ТВД применяют исключительно осевые компрессоры вследствие того, что они позволяют получить бóльшую степень повышения давления, имеют высокий КПД, малый вес и малые поперечные габаритные размеры. Компрессор, камеру сгорания, турбину и реактивное сопло в ГТД располагают так, чтобы получить промежуточный тракт, при котором имеют место малые гидравлические потери. Газовые турбины для двигателей большой тяги применяются исключительно осевого типа.

Для форсирования ТРД широко используют форсажные камеры, расположенные за турбиной. Схема турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой, показанная на рис. 1.1, является наиболее характерной для современных ДТРД.

К основным параметрам, характеризующим качественные технические показатели и степень совершенства ГТД, относятся: тяга; удельная масса двигателя; габаритные размеры; удельный расход топлива, ресурс и др.

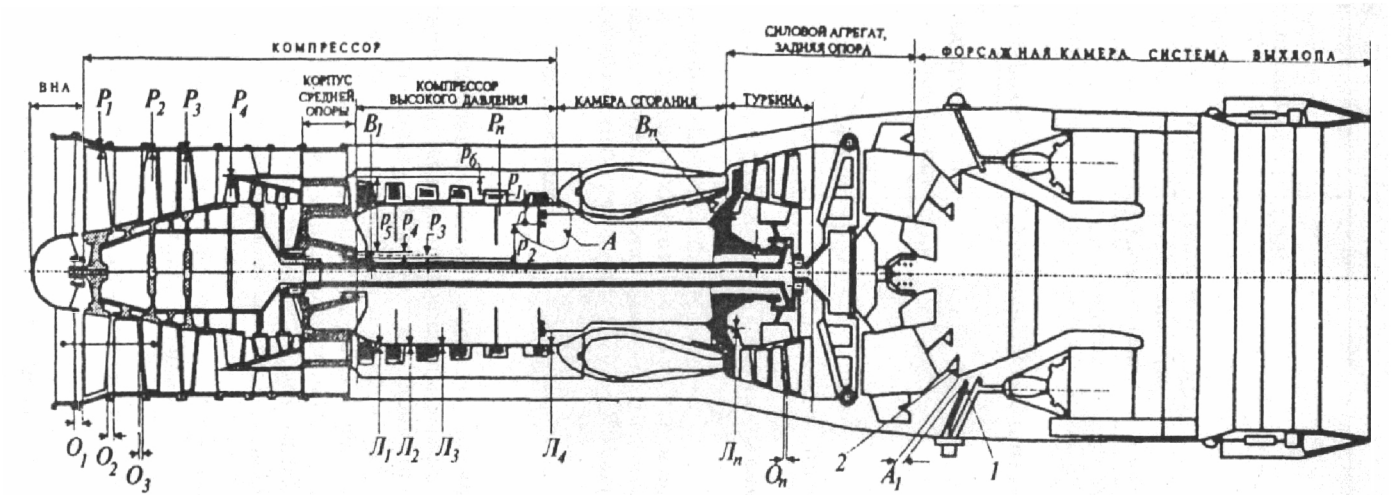


Рис. 1.1. Схема турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой

Сравнительная оценка двигателей с различной тягой определяется их ***удельной массой***, под которой понимается отношение массы двигателя к его номинальной тяге R (даН). Этот показатель в процессе развития конструкции и технологии производства двигателей постоянно снижается. Так, для первых ТРД с осевым компрессором этот показатель составлял 1,1, а для современных конструкций – 0,05. Малая удельная масса является важнейшим требованием для авиационных двигателей.

Габаритные размеры двигателя характеризуются площадью миделя F и длиной L. Наибольшее значение имеет площадь миделя F, так как она определяет лобовое сопротивление самолета. В ходе развития ГТД величина, обратная удельной лобовой площади ($1/f_{\text{лоб}} = R/F$, где $f_{\text{лоб}}$ – площадь поперечного сечения двигателя), существенно увеличилась: в начале развития ГТД она составляла 2000…2500 даН/м^2 для ТРД, в настоящее время она увеличена до 12000 даН/м^2 и более.

Удельный расход топлива C_e/R, определяемый для ТРД отношением расхода топлива C_e (кг) к тяге R, (даН за 1 ч), постоянно снижается. Так, для стендовых испытаний он на первых ГТД составлял 1,3…1,5 кг/(даН·ч), в настоящее время для ТРД он равен 0,7 кг/(даН·ч) и менее, а для ДТРД менее 0,5 кг/(даН·ч). Этот показатель важен для современных ГТД.

Удельный расход топлива зависит от конструкции ГТД и (в большой степени) от качества исполнения деталей и сборочных единиц. Увеличение относительного радиального зазора (отношение радиального зазора к длине лопатки) на 1% приводит к уменьшению КПД компрессора до 3%, что вызывает увеличение расхода топлива до 10% [1].

Это объясняется тем, что при больших зазорах возрастает перетекание воздуха из полости с бóльшим давлением в полость с меньшим давлением и уменьшается напор компрессора. В то же время увеличенные прогибы ротора и статора за счет неуравновешенных сил и моментов как по величине, так и по направлению, а также температурные деформации обуславливают необходимость увеличения радиальных зазоров, что приводит к ухудшению КПД компрессора и турбины и снижению диапазона устойчивости работы компрессора. Так, увеличение радиального зазора на 1% сужает диапазон устойчивости на 12…14%. Увеличение размеров стенок и диаметров валов при этом часто не дает преимущества по массе конструктивной схемы ГТД с малым числом опор. Это условие определяет важность выбора количества опор в ГТД. По мере развития двигателестроения непрерывно возрастает ***ресурс работы ГТД***. Если в начале развития ТРД его ресурс был 15…25 часов, то в настоящий момент он значительно вырос. Необходимо отметить,

что ресурс зависит от назначения изделия (гражданский или военный варианты, многоразовое или одноразовое использование). При освоении ГТД в серийном производстве ресурс двигателя изменился от 50 ч до 5…10 тыс. ч и более; а у конверсируемых изделий серии НК он составляет не менее 50 тыс. ч.

Изменение качественных показателей ГТД во времени зависит от конструкторского и (в бóльшей степени) от технологического совершенствования процессов производства деталей и сборочных единиц.

Кроме перечисленных основных качественных показателей изделий на передний план могут выдвигаться и другие качественные характеристики ГТД, например: удобство обслуживания и ремонта двигателя в процессе эксплуатации; модульность конструкции двигателя; стабильность качественных характеристик во времени при эксплуатации в различных климатических условиях и т.д.

1.2. ОСОБЕННОСТИ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ГТД

Авиационные двигатели работают в тяжелых условиях при эксплуатации в различных климатических зонах. Требования к надежности изделий постоянно растут. Показатели качества двигателей увеличиваются. Возрастают затраты на изготовление отдельных деталей и сборочных единиц. Эти условия определяют пути совершенствования ГТД.

1. **Применение облегченной, ажурной, сложной конструкции деталей и сборочных единиц ГТД** (рис. 1.1). Корпусные детали имеют тонкостенную конструкцию с различными выемками, облегченями, ребрами жесткости, фасонными поверхностями рабочих контуров и т.д.

Промежуточные кольца корпусов компрессора и турбины имеют значительные диаметры при малой толщине стенки.

Рабочий тракт компрессора и турбины выполняется с минимальным отклонением профиля от номинального положения.

Лопатки роторов компрессора и турбины, а также спрямляющие и сопловые лопатки имеют сложную пространственную форму с малыми размерами по толщине профиля и высокоточными элементами замковой части.

Диски роторов компрессора и турбины имеют облегченную конструкцию (толщина полотна диска компрессора равна 3…5 мм) с усиленными ступицей и бандажным венцом.

Валы ГТД имеют значительную протяженность при относительно малых диаметрах и толщине стенки. На них располагается множество

рабочих поверхностей в виде шлицевых, резьбовых, шпоночных, а иногда и зубчатых элементов.

Камеры сгорания имеют сложную пространственную форму, выполнены из тонколистового материала, обеспечивающего значительные перепады температур и сил при эксплуатации ГТД.

2.Совершенствование газотурбинного тракта ГТД и оптимизация температурной напряженности элементов конструкции, направленные на повышение КПД турбины и компрессора.

Газодинамическое совершенствование тракта является одним из основных путей улучшения качественных показателей ГТД. Даже незначительное его улучшение приводит к существенному сбережению энергоресурсов.

Высокотемпературные турбины современных и перспективных ГТД отличают все более интенсивное охлаждение первых ступеней, относительно малые длины их лопаток и высокая газодинамическая нагруженность, приводящая к возникновению сверхзвуковых скоростей и больших углов поворота потока на венцах [3].

Вследствие высокой степени расширения проточная часть турбины получается со значительным меридианным раскрытием и сильным изменением параметров радиуса в последних ступенях. Исследования по повышению качественных показателей турбин и совершенствование методов проектирования газодинамического тракта позволили получить у авиационных ГТД четвертого поколения высокий КПД. Для одноступенчатых турбин компрессора КПД составляет 0,88…089. Для двухступенчатых турбин компрессора и многоступенчатых турбин вентилятора – 0,91…0,915. При испытании газогенератора ТВВД серии НК-93 установлено, что на первой ступени турбины достигнут КПД в диапазоне 0,91…0,92.

Совершенствование тракта ГТД привело к изменению геометрической формы профилей лопаток роторной и статорной части, например: в ТРД, ТВД и силовых установках семейства НК (86,144,321,93,14,16 и т.д.) использованы профили знакопеременной кривой на корыте или разнотолщинные лопатки, на которых произведена оптимизация углов входа в решетку; в ТРД использованы ступени с наклонными и саблевидными обратно закрученными по углу входа сопловыми лопатками; использован вдув охладителя на корыто вблизи входной кромки и создано противодавление при выдуве.

3. Применение современных материалов (алюминиевых, магниевых, титановых, хромоникилиевых жаропрочных сплавов, различных композитных материалов) и **жаростойких керамических покрытий**. Выбор материала определяется температурой нагрева и силовым воздействием на детали двигателя при эксплуатации. При температуре менее 200°С используются магниевые сплавы, при температуре около 250°С – листовой дуралюмин, при температуре до 500°С – нержавеющая (коррозионностойкая) сталь, а при температуре выше 1000°С – жаропрочные хромоникелевые сплавы. Так, лопатки входного направляющего аппарата компрессора низкого давления и лопатки ротора низкого давления изготавливают из низколегированных теплоустойчивых сталей Х12Н9, Х15Н5Д2Т и титановых сплавов, а лопатки статора и ротора компрессора высокого давления – из хромистых теплоустойчивых легированных сталей, а также из жаростойких сталей и сплавов на никель-хромовой основе (нихромы). Введение алюминия (до 3,5%) существенно повышает жаростойкость, жаропрочность (особенно в интервале температур 700…800°С) и технологичность сплавов. Лопатки сопловых аппаратов турбин изготавливают из жаропрочных высоколегированных сплавов. В качестве легирующих элементов используют титан, молибден, ниобий в небольших количествах, а также вольфрам. Вольфрам значительно повышает жаропрочность сплавов и почти не ухудшает жаростойкость.

В табл. 1.1 представлен примерный перечень основных материалов, применяемых для деталей, установленных в различных зонах двигателя, и термические операции обработки.

Повышение эксплуатационных требований к деталям ГТД вызвало появление новых жаростойких и жаропрочных материалов. Так, для изготовления охлаждаемых лопаток турбины с внутренней полостью используется технология литья по выплавляемым моделям со сплавами на основе никеля (ЖС6КВИ, ЖС6уВИ, ЖСФВИ, ЖС-30, ЖС-30ВИ, ЖС-40, ВЖЛ-12Э и др.), которые имеют хорошие механические свойства ($\sigma_в$ = 850 Па/мм, относительное удлинение δ = 3…5%, относительное сужение ψ = 4…7%) и длительную прочность при температуре 975°С и нагрузке 20 Н в течение 22…40 ч. Эти материалы обеспечивают технологию изготовления бесприпусковых лопаток.

Таблица 1.1 – Материалы, применяемые для изготовления элементов ГТД

Основные сборочные единицы ГТД	Основные элементы сборочных единиц	Используемые материалы	Термическая обработка	Способ получения исходных заготовок и конструкций
Входной направляющий аппарат (ВНА)	Наружная оболочка	38ХА, 38Х2МЮА	З+О, ОН, ОВ	ХШ
	Корпус ВНА	АМЦ, Д16	ОТЖ, З+СТ	Л, Ш
Компрессор низкого давления (КНД)	Наружная оболочка	38Х2МЮА, 13Х3Н13М2Ф	З+О, ОН	ХШ, Св, СбК
	Корпус компрессора	30Х13 15Х16Н2АМ 30ХГСА 13Х11Н2В2МФ	ОТЖ, З+О Н +ОВ З+О ОТЖ, З+О	Р ХШ, Св, СбК
	Статорные лопатки	1Х12Н9, Х15Н5Д2Т, ВТ-20, ВТ-9	Н+ОВ, Н+О ОТЖ	ВАЛ ИЗШ, ТОШ, ВСШ
	Роторные лопатки	ВТ-9 ВТ-20 ЭП-517, ЭП-718ИД	ОТЖ ОТЖ З+О	ИЗШ, ОШ ИЗШ, ВСШ Ш, ВАЛ
	Диски	ВТ-9 ВТ-20	ОТЖ ОТЖ	Ш Ш
	Лабиринтные уплотнения	18ХНВА, 40ХНМА 13ХН14ВФРА Х24Н25Т	Н+ОВ З+О З+О	Ш Ш Ш
Корпус средней опоры (КСО)		АЛ-4, АВТ1	З+С	Л

Продолжение табл. 1.1

Основные сборочные единицы ГТД	Основные элементы сборочных единиц	Используемые материалы	Термическая обработка	Способ получения исходных заготовок и конструкций
Компрессор высокого давления (КНД)	Наружная оболочка	38Х2МЮА 13Х3Н13М2Ф 15Х16Н2АМ	З+О, ОН ХТО З+О	ХШ, Св, СбК
	Корпус компрессора	15Х16Н2АМ 30ХГСА 13Х11Н2В2МФ Х15Н5Д2Т	Н +ОВ З+О З+О З+О	Р ХШ, Св, СбК
	Статорные лопатки	1Х17Н2 Х15Н5Д2Т ВТ-9 ЭП-517, ЭП-718ИД ЖС6УВИ	З+О З+О ОТЖ З+О З+О	Ш, ВСШ, ИЗШ, ВАЛ
	Роторные лопатки	ВТ-20 ЭП-517, ЭП-718ИД	ОТЖ З+О	ИЗШ, ВСШ Ш, ВАЛ
	Диски	ВТ-9 ВТ-20	ОТЖ ОТЖ	Ш Ш
	Лабиринтные уплотнения	18ХНВА, 40ХНМА 13ХН14ВФРА Х24Н25Т	Н+ОВ З+О З+О	Ш Ш Ш

Продолжение табл. 1.1

Основные сборочные единицы ГТД	Основные элементы сборочных единиц	Используемые материалы	Термическая обработка	Способ получения исходных заготовок и конструкций
Камера сгорания (КС)	Наружный кожух	Х18Н9Т, ВЖ98, ВЖ102	З, Вз	ХШ, Св, СбК
	Жаровая труба	Х77ТЮР (ЭИ-437Б) ХН77ТЮР-ВД (ЭИ-437Б-ВД) ХН77ТЮРУ-ВД (ЭИ437БУВД) ХН78Т (ЭИ-435) ХН80ТБЮ (ЭИ-607)	З+Сб	ХШ, Св, СбК
Турбина	Наружная оболочка	ХН77ТЮРУ-ВД (ЭИ437БУВД) ХН78Т (ЭИ-435) ХН80ТБЮ (ЭИ-607) ЖС6У-ВИ	З+Сб	ХШ, Св, СбК
	Корпус турбины	ХН80ТБЮ (ЭИ-607) ЖС6У-ВИ	З+Сб	ХШ, Св, СбК
	Статорные лопатки	ХН80ТБЮ (ЭИ-607) ЖС6У-ВИ, ЖС6ФВИ	З+Сб	ХШ, Св, СбК

Продолжение табл. 1.1

Основные сборочные единицы ГТД	Основные элементы сборочных единиц	Используемые материалы	Термическая обработка	Способ получения исходных заготовок и конструкций
Турбина	Роторные лопатки	ХН77ТЮРУ-ВД (ЭИ437БУВД) ХН78Т (ЭИ-435) ХН80ТБЮ (ЭИ-607) ЖС-3, ЖС6-К, ЖС6У-ВИ ЖС6Ф-ВИ, ЖС-40 ЖС-30ВИ, ЖС-30	З+Сб	Ш, ЛНК, МКО
	Диски	ХН77ТЮРУ-ВД (ЭИ437БУВД) ХН80ТБЮ (ЭИ-607) ХН62БМКТЮ-ПД	З+Сб	Шзш
	Лабиринтные кольца	ВЖЛ-14, ВЖЛ12У	З+Вз	Ш
Вал	Вал низкого давления	15Х12Н2МВДАБ-Ш	Н, З+О	Ш
	Вал высокого давления	15Х12Н2МВДАБ-Ш	Н, З+О	Ш
	Подшипники			СбК
Задняя опора, силовой агрегат (ЗО)	Наружная оболочка	Х18Н9Т, ВЖ98, ВЖ102	З, Вз	ХШ, Св, СбК

Продолжение табл. 1.1

Основные сборочные единицы ГТД	Основные элементы сборочных единиц	Используемые материалы	Термическая обработка	Способ получения исходных заготовок и конструкций
Задняя опора, силовой агрегат (ЗО)	Корпус задней опоры	13Х11Н2В2МФ, Х15Н5Д2Т, Х77ТЮР (ЭИ-437Б) ХН77ТЮР-ВД (ЭИ-437Б-ВД)	З+О	ХШ, Св, СбК
Выхлопное устройство	Наружная оболочка	Х18Н9Т	З, Вз	ХШ, Св, СбК
	Форсажная камера	Х18Н9Т, ВЖ98, ВЖ102	З, Вз	ХШ, Св, СбК
	Реактивное сопло	ВЖ98, ВЖ102	З, Вз	ХШ, Св, СбК
Агрегаты двигателя	Корпусные детали	АК4-1, АК6, АК8, ВТ3, ВТ9	З, С ОТЖ	Л, Ш
	Шестерни	1Х18Н9Т, 38ХМЮА, 40ХНМА, 40ХН2МА-Ш	Н, Ц, З+О Н, Аз, З+О Н, З+О	Ш
Топливная, воздушная, масляная системы	Трубопроводы	1Х18Н9Т, Х17Н13М3Б	Н, Ц, З+О	Пр
	Компенсаторы	1Х18Н9Т	Н, Ц, З+О	Ш
	Крепежные элементы	1Х18Н9Т	Н, Ц, З+О	Ш

Примечание. Условные обозначения: З – закалка; О – отпуск; ОН – отпуск низкий; ОВ – отпуск высокий; ОТЖ – отжиг; СТ – старение; Н – нормализация; Сб – стабилизация; Вз – охлаждение на воздухе; Ц – цементация; Аз – азотирование; ХШ – холодная штамповка; Л – литье; Ш – штамповка; Св – сварка; СбК – Сборная конструкция; Р – раскатка; ВАЛ – вальцовка; ИЗШ – изотермическая штамповка; ТОШ – точная штамповка; ВСШ – высокоскоростная штамповка; Л – литье; ЛНК – литье с направленной кристаллизацией; МКО – монокристаллическая отливка; Пр – прокат,

В связи с ростом температуры на входе в турбину ГТД используются технологии создания двух–, трехслойных термостойких, термобарьерных покрытий потоками высокотемпературной импульсной плазмы [6]. Внешний керамический барьерный слой (ZrO_2–Y_2O_3, ZrO_2–MgO) толщиной 70…110 мкм наносится на подслой керамики и металла (65/35) и слой металла (Ni–Cr–Al–Y), находящийся на основной подложке. Толщина системы достигает 500 мкм. Тепловое упрочнение позволяет создать стойкое керамическое покрытие, которое способствует увеличению долговечности высоконагруженных элементов ГТД.

4. Применение термических и термохимических воздействий на основные детали ГТД. В практике термической обработки сталей и сплавов происходят фазовые превращения, например: неупорядоченная структура феррокарбидной смеси (ферроперлитная, перлитная с избыточным карбидом) в стали при нагреве выше критических точек переходит в полиморфное состояние, а при переходе через критическую точку образуется мелкое зерно аустенита. В зависимости от легирования и скорости нагрева стали группируют по степени проявления структурной наследственности. Легирование стали влияет на критическую точку нагрева и охлаждения.

Проведение качественной термической обработки деталей ГТД из различных сталей и сплавов в бóльшей степени определяют качество изделия (см. табл. 1.1). Место термических операций в технологическом процессе изготовления деталей и сборочных единиц, особенно для маложестких конструкций ГТД часто является решающим. В табл. 1.1 приведены основные термические и термохимические операции для деталей на различных этапах технологического процесса изготовления [4].

5. Обеспечение высокой точности изготовления деталей, сборочных единиц и всего изделия. Приведенные на рис. 1.1 радиальные зазоры P_1, P_2, P_3, ..., P_n между лопатками компрессора и турбины с элементами корпуса; осевые зазоры O_1, O_2, O_3, ..., O_n; зазоры B_1, B_2, ..., B_n между валами, а также зазоры $Л_1$, $Л_2$, $Л_3$, ..., $Л_n$ в лабиринтных уплотнениях определяют тягу, расход топлива, температурную напряженность элементов конструкции и КПД отдельных узлов и всего двигателя.

Точность расположения деталей относительно друг друга является важной характеристикой показателей качества.

Точность выполнения геометрических параметров ГТД – залог надежной и качественной работы всего изделия. В то же время точность, например, радиального зазора P_n определяется точностью изготовления

входящих деталей: лопаток и диска турбины (p_1 и p_2), подшипника (p_3, p_4) и статора (p_5, p_6). В связи с этим показатели точности отдельных деталей ГТД являются весьма высокими:

рабочих шеек валов в пределах IT5;

формы шеек валов до 0,003 мм;

допустимое биение шеек валов относительно друг друга не более 0,01…0,02 мм;

замков лопаток компрессора и турбины в пределах IT5 и выше;

расположения элементов замка лопатки относительно друг друга не более 0,008 мм;

зазоров в лабиринтных уплотнениях компрессора и турбины 0,03…0,04 мм;

зазоров в бандажных венцах колес турбины ступеней 1 и 2 не более 0,05 мм;

допустимое смещение профиля пера лопатки компрессора, турбины, соплового и направляющего аппарата не более 0,08…0,15 мм;

динамической балансировки роторов компрессора и турбины в пределах 0,3…0,4 Н/см^2 и т.д.

Размерные расчеты, проводимые на стадии проектирования и при сборке изделий, базируются на допущении об идеальности формы и взаимного расположения граничных поверхностей деталей. Реальные поверхности деталей по своей топографической форме и взаимному расположению вследствие технологических погрешностей могут существенным образом отличаться от идеализированных прототипов, положенных в основу размерных расчетов.

Как показывают исследования [5], именно контактные явления соответствующие каждой паре соприкасающихся поверхностей, обуславливают стабильность выходных характеристик изделия.

На рис. 1 показано место соединения роторов компрессора и турбины ГТД (элемент А). Контактные условия этого сопряжения являются весьма важными: от качества исполнения стыковых поверхностей соединения непосредственно зависит надежность изделия.

В месте соединения лопаток турбины в верхнем бандажном венце происходят контакты элементов лопаток, которые работают при значительных динамических и температурных нагрузках в процессе эксплуатации. От качества подготовки этих элементов зависит надежность всего изделия. В связи с этим в задачах, возникающих при размерном анализе изделия, зона стыка представляется в виде (составляющего) звена размерной цепи. Звено-стык представляется как замыкающее звено

контактной цепи, в которой составляющими звеньями являются контактные деформации (сближения) стыковых поверхностей сопрягаемых деталей.

Работа стыковых элементов ГТД может иметь пластический, пластический с упрочнением, упругопластический и упругий характер. При этом требования по состоянию поверхностей стыковых соединений существенно возрастают. Так, шероховатость стыковых поверхностей лопаток определяется значениями *Ra* 0,2…0,32 мкм и выше, точность исполнения этих поверхностей IT5…IT8 и часто требуется проведение специальных доводочных операций при сборке колес турбины и компрессоров.

При таких путях совершенствования ГТД значительно возросла сложность изготовления отдельных деталей и сборочных единиц. Например, применение в ГТД лопаток турбины, изготовленных из жаропрочных труднообрабатываемых сплавов, со сложной внутренней полостью охлаждения при весьма высоких требованиях к точности профиля пера, к точности замка и бандажных полок резко усложнило производство.

Использование в ГТД промежуточных колец большого диаметра (1,5…2 м) с малыми толщинами стенок (8…10 мм) и значительными боковыми фланцами для крепления увеличивает длительность технологического процесса и материалоемкость изделия. Использование традиционных способов получения заготовок колец и методов их обработки для труднообрабатываемых материалов усложняет задачи производства.

Такое положение в развитии ГТД выдвинуло на первый план задачи по совершенствованию методов и средств производства деталей и сборочных единиц. Жесткие требования к срокам освоения новых изделий в производстве (срок освоения двигателя должен быть не более 2-3 лет) при относительно небольших партиях выпускаемых изделий делают эти задачи весьма сложными.

Создание конкурентоспособных ГТД с хорошими экономическими показателями производства обуславливает необходимость разработки быстропереналаживаемых и экономически выгодных технологических процессов изготовления современных изделий.

1.3. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ ГТД И ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ

Понятие технологичности конструкции изделия – относительное. По мере совершенствования конструкции, средств производства, изменения способов и условий эксплуатации изделия изменяются экономические показатели производства и эксплуатации.

Мера использования экономичных и производительных методов изготовления и оптимальных технологических процессов определяет технологичность конструкции. Конструкция изделия, в которой эти возможности полностью учтены, называется технологичной.

Технологичность конструкции изделия определяется совокупностью свойств, проявляемых в возможности оптимальных затрат труда, средств, материалов и времени при технической подготовке производства, изготовлении, эксплуатации и ремонте по сравнению с соответствующими показателями однотипных конструкций изделий того же назначения при обеспечении установленных значений показателей качества.

На стадии технологической подготовки особое внимание следует уделять производственной технологичности конструкции изделия, определяемой применительно к его изготовлению [7, 8]. Конструкция изделия, разработанная для мелкосерийного производства, оказывается неприемлемой для серийного и массового производства и, наоборот.

На базе многолетнего развития и совершенствования техники и технологии производства изделий в машиностроении и, в частности, в авиадвигателестроении сложились определенные правила по проектированию изделий и технологических процессов для изготовления изделий и его элементов. Эти правила постоянно изменяются и совершенствуются.

Для экономичного производства деталей ГТД необходимо выполнять следующие основные правила:

1) создавать детали с простой конфигурацией поверхностей, позволяющей обрабатывать их с максимальной производительностью;

2) обеспечивать наличие простых и качественных базовых поверхностей деталей для надежного закрепления и ориентирования заготовок в технологической системе;

3) использовать конструкции деталей, обладающие высокой жесткостью для применения максимальных режимов при обработке поверхностей;

4) применять материалы деталей с хорошей обрабатываемостью на различных этапах технологического процесса;

5) обеспечивать оптимальную простановку геометрических и других параметров для поверхностей деталей и их расположения относительно друг друга, позволяющую производить обработку поверхностей на настроенном оборудовании в автоматическом и полуавтоматическом режиме и т.д.

Многие детали ГТД обладают невысокой, с точки зрения состояния машиностроительного производства, технологичностью. Так, обрабатываемость жаропрочных сплавов при холодной обработке металлов резанием в 10 и более раз хуже обрабатываемости машиностроительных сталей. Профили пера лопаток роторной и статорной части ГТД имеют сложную пространственную форму у маложесткого элемента конструкции. У большинства лопаток роторов компрессора и турбины отсутствуют надежные технологические базовые установочные поверхности и т.д.

Это свидетельствует о том, что производство ГТД является весьма сложным. Поэтому кроме традиционных методов и средств обработки, применяемых в машиностроительном производстве, в авиационном двигателестроении идет постоянный поиск и совершенствование методов и средств производства, отражающих особенности конструкции ГТД и требований к ним.

1.4. НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ И СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ

Развитие современных ГТД, вызвавшее применение облегченной ажурной конструкции из труднообрабатываемых материалов, повышенные требования к точности исполнения отдельных элементов деталей и сборочных единиц, к качеству поверхностей и соединений, к мобильности производства, определили следующие основные направления совершенствования технологических процессов производства.

1. Создание новых и совершенствование традиционных методов получения заготовок:

отливок заготовок из жаропрочных сплавов с направленной кристаллизацией или монокристаллических отливок в оболочковые формы по выплавляемым моделям для формирования беспripусковых заготовок по перу для лопаток первых ступеней турбины;

со сложными пространственными поверхностями из труднообрабатываемых материалов, полученных горячим деформированием материалов в условиях сверхпластичности;

лопаток с высокой точностью профиля пера для различных ступеней компрессора с использованием высокоскоростной штамповки;

лопаток горячей и холодной вальцовки;

штамповкой в закрытых штампах;

колец больших диаметров с малой толщиной стенки раскаткой при непрерывном нагреве зоны раскатки токами высокой частоты;

близких к форме готовой детали с использованием эффекта сверхтекучести материала;

методами порошковой и гранульной технологий.

2. Создание новых и совершенствование традиционных методов обработки заготовок:

лазерной обработки из труднообрабатываемых материалов, имеющих ажурную тонкостенную конструкцию высокой точности;

высокоточной сварки заготовок из тонколистовых материалов для крупногабаритных конструкций;

электрохимической обработки (ЭХО) материалов при формировании сложных пространственных профилей заготовок;

электроискровой (ЭИ) и электроимпульсной (ЭИМ) обработки для получения отверстий малого диаметра в жаропрочных и титановых сплавах;

ультразвуковой обработки для интенсификации процесса резания металлов при точении, шлифовании, нарезании резьб, а также в процессе сборки и контроля качества продукции;

деформационно-упрочняющих методов обработки поверхностей деталей.

3. Использование и создание нового оборудования и оснастки для производства деталей современных ГТД:

многоцелевого оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ);

гаммы станков для ЭХО-, ЭИ-, ЭИМ-методов обработки заготовок;

универсально-сборных приспособлений (УСП);

установочных кассет для ориентирования заготовок в технологической системе.

4. Создание и применение устройств и высокоточных методов контроля геометрических параметров деталей, качества поверхностей, качества материала и элементов соединения сборочных единиц:

оптико-электронных бесконтактных устройств с приборами с зарядной связью (ПЗС) для контроля и хранения в памяти ЭВМ фактических значений параметров деталей и сборочных единиц;

лазерных установок для контроля труднодоступных и высокоточных элементов деталей и сборочных единиц;

универсальных и специализированных координатно-измерительных машин (КИМ) с ЧПУ;

неразрушающих методов контроля для оценки качества материала и соединений;

контрольно-измерительных электронных головок для контроля качества заготовок и управления технологическим процессом;

«математической сборки» деталей по фактическим значениям составляющих параметров для прогнозирования с помощью ЭВМ качества сборочных единиц и т. д.

5. Развитие технологий по созданию термостойких и термобарьерных покрытий деталей высокосоконагруженного тракта ГТД:

плазменного напыления многослойных покрытий;

электронно-лучевой технологии при создании термостойких покрытий;

вакуумно-плазменного напыления многослойных покрытий;

термического упрочнения многослойного керамического покрытия и т.д.

ГЛАВА 2
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ

2.1. МЕТОДЫ ДОСТИЖЕНИЯ ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ И СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ

При обработке заготовок на различных этапах технологического процесса с использованием оборудования и оснастки обеспечивается выполнение операционных размеров, технических требований и других показателей качества. Заданные значения качества и допустимые отклонения определяют точность и необходимую шероховатость поверхностей, расположение их относительно друг друга, напряженное состояние, твердость поверхностного слоя и другие параметры заготовок.

При изготовлении отдельных заготовок или партии на металлорежущем или другом виде оборудования для достижения заданных значений параметров качества в авиационном двигателестроении используются следующие методы достижения точности:

автоматического получения параметров на настроенном оборудовании;

пробных проходов и промеров;

комбинированный.

Метод автоматического получения параметров. На настроенном оборудовании наладка выполняется таким образом, что требуемая точность достигается автоматически у партии обрабатываемых заготовок. Работы, которые необходимо выполнить при использовании этого метода, можно разделить на два этапа.

Первый этап заключается в подборе инструмента (или нескольких инструментов), установке его на нужный настроечный размер и обработке первой «пробной» заготовки. После этого проводится контроль полученных значений параметров качества заготовки. Этот этап работы выполняет высококвалифицированный наладчик, который в серийном производстве обслуживает несколько станков.

Второй этап заключается в обработке партии заготовок без вмешательства оператора в процесс формирования показателей качества заготовок. Рабочий выполняет на этом этапе установку, обработку и снятие

заготовок. Кроме того, он периодически контролирует показатели качества заготовок универсальными или специальными контрольно-измерительными устройствами. В случае нарушения параметров качества заготовок или приближения их величин к границам предельно допустимых значений обработка заготовок прекращается. После этого производится подналадка или переналадка операции.

Второй этап обработки может быть механизирован или полностью автоматизирован. В этом случае работы, связанные с установкой и снятием заготовок, осуществляются робототехническим комплексом. При автоматизации первого и второго этапов работ достигаются условия по созданию безлюдных технологий.

Необходимо отметить, что совершенствование технологии изготовления ГТД, оборудования, оснастки и средств производства направлено на механизацию и автоматизацию процессов обработки. Использование оборудования и оснастки с ЧПУ и компьютерных технологий способствует выполнению задач автоматизации технологических процессов.

Метод пробных проходов и промеров. Точность заготовок достигается последовательно для каждой заготовки из партии. В этом случае два этапа (настройка и обработка) совмещены. Работу выполняет высококвалифицированный рабочий.

Сущность метода заключается в подборе инструмента и необходимой оснастки в соответствии с операционной картой (в отдельных случаях по чертежу детали) и настройке режущего инструмента на размер. При этом на коротком участке заготовки снимают пробную стружку. После этого станок останавливают, делают пробный замер полученного размера, определяют его отклонения от заданного значения и вносят изменение в положение инструмента, которое отсчитывают по лимбу станка. Затем вновь проводят пробную обработку участка заготовки и контроль параметров.

Таким образом, путем пробных проходов устанавливают правильное положение режущего инструмента. После этого выполняют обработку заготовки по всей длине. В отдельных случаях при использовании данного метода производят разметку заготовок.

Этот метод используется в единичном и мелкосерийном производстве и может обеспечивать высокую точность при обработке заготовок. Недостатком метода является невысокая производительность, сложность механизации и автоматизации процессов наладки и обработки поверхностей заготовок.

Комбинированный метод. Метод пробных проходов и промеров используют для выполнения одного параметра из всего множества заданных значений операционных размеров. Все остальные заданные значения операционных размеров, как правило, выполняются на настроенном оборудовании по специальной программе или с помощью различных копирных устройств и других средств автоматизации.

2.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОЛУЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАГОТОВОК НА НАСТРОЕННОМ ОБОРУДОВАНИИ

Направление современного развития средств производства ориентировано на прогрессивный метод автоматического получения параметров заготовок на настроенном оборудовании.

Работа станков с ЧПУ тесно связана с системой координат. Оси координат располагают параллельно направляющим станка, что позволяет при программировании обработки указывать направление и значение перемещения рабочих органов. В качестве единой системы для всех станков с ЧПУ принята стандартная система XYZ.

Положительные направления движения заготовки относительно неподвижной части станка указывают оси X', Y', Z', направленные противоположно осям X, Y, Z. Таким образом, положительными всегда являются такие движения, при которых инструмент и заготовка удаляются друг от друга.

Круговые перемещения инструмента (например, угловое смещение оси шпинделя станка) обозначают буквами A (вокруг оси X), B (вокруг оси Y), C (вокруг оси Z), а круговые перемещения относительно координатной системы X', Y', Z' соответственно A', B', C' [9].

На рис. 2.1. представлена стандартная система координат револьверного станка с ЧПУ. В этой системе показаны, для примера, основные направления перемещения вдоль осей X и Y и круговое движение – C относительно оси Z.

В этой координатной системе станка располагаются координатные системы приспособления, инструмента и заготовки. Координатная система $X_nY_nZ_n$ приспособления может совмещаться с нулевой точкой M станка, а может быть смещена на величину $П$, (как в примере) в зависимости от габаритных размеров приспособления.

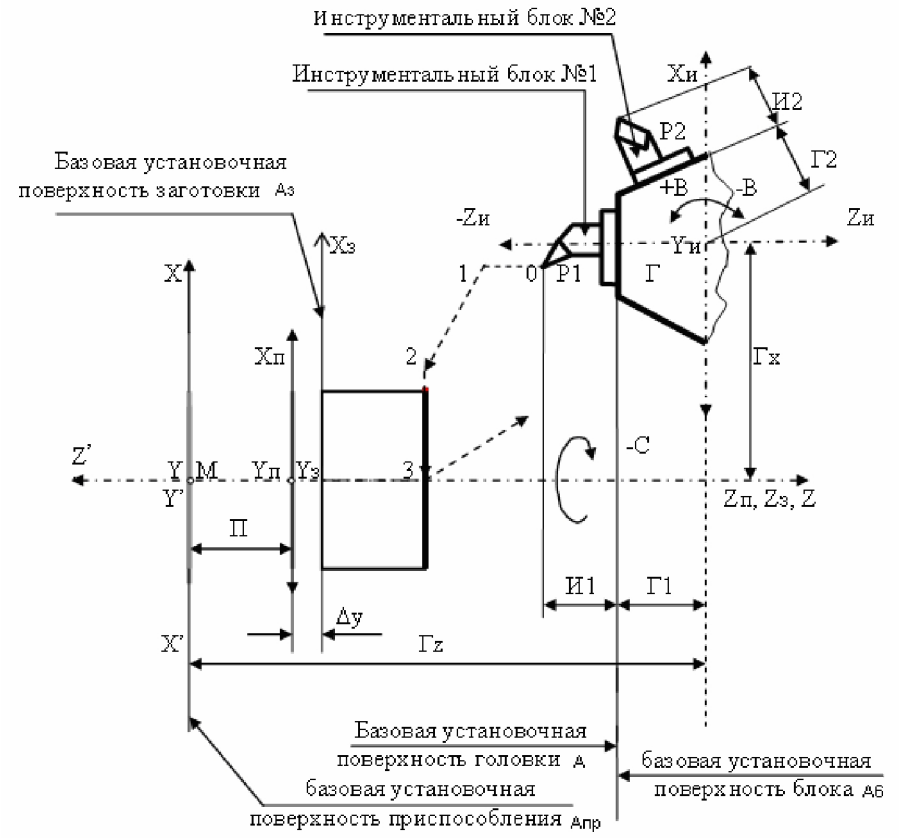


Рис. 2.1. Система координат револьверного станка с ЧПУ

Совмещение координатных осей приспособления осуществляется при наладке операции технологического процесса и может быть достигнуто сменой приспособления или выверкой положения базовых установочных элементов приспособления относительно координат станка.

В отдельных случаях используется даже обработка базовых установочных поверхностей приспособления «по месту», т.е. базовые поверхности приспособления в процессе наладки обрабатываются (например, применяется расточка «сырых» кулачков и подрезка торцев кулачков у самоцентрирующих патронов). Этот способ используется при

невысокой степени точности применяемой оснастки и позволяет повысить точность совмещения координатных систем приспособления и станка.

Совмещение координатной системы заготовки $X_з$ $Y_з$ $Z_з$ осуществляется в процессе установки и закрепления ее в приспособлении. В рассматриваемом примере несовпадение осей в направлении координаты Z – величина Δy. После закрепления в координатной системе XYZ станка заготовка становится единым целым с элементом шпинделя станка и приспособления.

Обработка поверхностей заготовки осуществляется режущими инструментами, закрепленными в инструментальные блоки №1 и №2, которые размещены в револьверной головке с координатами X_u, Y_u, Z_u. Положение оси этой револьверной головки $Г$ определяется координатами $Г_x$ $Г_z$, точность выполнения которых контролируются при изготовлении станка на станкостроительном заводе. Точность станка (нормальная, повышенная, высокая и т.д.) фиксируется в паспорте станка и периодически проверяется в процессе профилактического или текущего ремонта оборудования.

В координатной системе револьверной головки $Г$ размещены инструментальные блоки, которые настраиваются вне станка на размеры $И_1$, $И_2$. Смена инструментальных блоков в процессе наладки и выполнения операции обеспечивает точное положение настроечных точек P_1, P_2,... инструмента в определенном месте. В рассматриваемом примере настроечная точка P_1 совпадает с исходной точкой 0.

При установке инструментальных блоков в револьверную головку обеспечивается соединение базовой установочной поверхности блока с базовым установочным элементом револьверной головки с высокой точностью и надежностью соединения. При этом положение точки P_1 относительно оси револьверной головки в направлении оси Z определяется соответственно размерами $И_i$ (блока), $Г_i$ (головки). Подобным образом задается также положение точки P_1 в направлении оси X. Поворотом револьверной головки в направлении $+B$ или $-B$ осуществляется в нужный момент смена инструмента.

Движение настроечной точки инструмента в технологической системе из исходной точки 0 в точку *1, 2* и т.д. обеспечивает разработанная программа движения инструмента по необходимой траектории. Скорость движения инструмента при этом изменяется в зависимости от заданных условий обработки.

На основании приведенной схемы работы станка с ЧПУ рассмотрим возможность автоматического получения параметров на настроенном станке при различных вариантах базирования заготовки и задания операционных размеров.

На рис. 2.2 представлена схема установки заготовки в технологической системе. Базовые элементы приспособления создают координатную систему $X_nY_nZ_n$, которая размещена в координатной системе станка при наладке операции. В данной координатной системе проводится смена заготовок и обработка их в соответствии с операционным эскизом по заданной программе станка с ЧПУ.

После установки и закрепления заготовки в технологической системе инструментальный блок №1 из исходной точки 0 на холостом ходу перемещается в точку *1*, производит проточку цилиндрической поверхности заготовки до точки *2*, затем из точки *2* перемещается в точку *3*, произведя подрезку торца заготовки. Из точки *3* на холостом ходу блок № 1 возвращается в исходное положение, где происходит смена позиции револьверной головки.

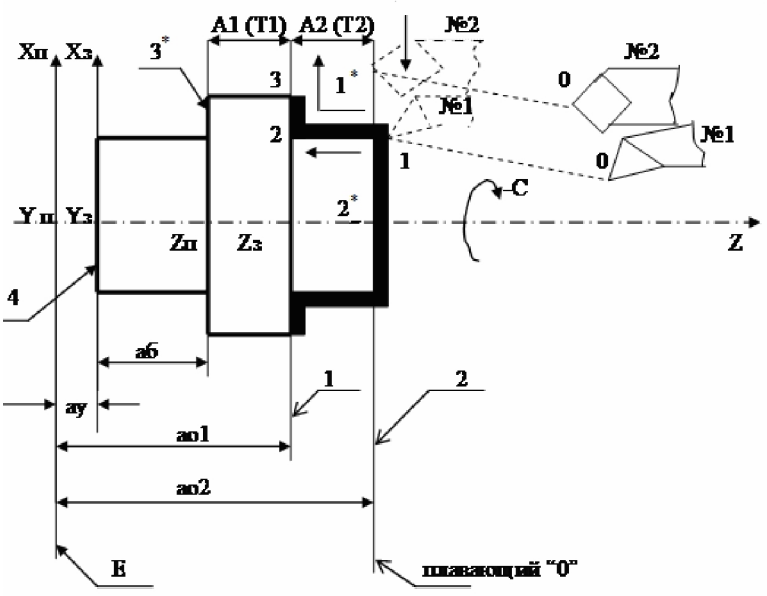


Рис. 2.2. Схема установки заготовки в технологической системе

Инструментальный блок № 2 из исходной точки (или другой расчетной точки) перемещается в точку 1^* на холостом ходу, производит подрезку торца заготовки до точки 2^* в рабочем режиме и возвращается в исходное положение.

В процессе этих движений режущих инструментов в технологической системе по разработанной программе для станка с ЧПУ должны быть получены в заданных допустимых пределах два операционных линейных размера A_1 и A_2.

Выполнение заданных операционных размеров A_1 и A_2 и допусков T_1 и T_2 зависит от различных причин и условий обработки заготовок. Выполнение размера A_2 и заданного допуска T_2 определяется траекторией движения двух инструментальных блоков в технологической системе.

На рис. 2.2 в координатной системе показаны размеры a_{o1} и a_{o2}, отражающие *фактическое положение поверхностей 1* и *2* заготовки относительно исходной поверхности E технологической системы. Фактические значения размеров a_{o1} и a_{o2} зависят от многих факторов, например:

от жесткости технологической системы;

от режимов резания;

от твердости обрабатываемого материала заготовки;

от эффективности охлаждения зоны обработки;

от припуска, удаляемого в процессе обработки заготовок и других факторов.

Перечисленные факторы отражают применяемый метод обработки заготовок на данной операции. Если принять условие, что отклонение фактических размеров a_{o1} и a_{o2} от требуемых значений равны нулю, то операционный размер A_2 также будет выполнен без отклонения от заданного значения. В этом случае размер A_2 для партии заготовок будет постоянным.

На выполнение операционного размера A_1 оказывают влияние составляющие размеры a_{o1}, a_y, и $a_б$. Рассеивание значений этих составляющих в партии обрабатываемых заготовок влияет на формирование фактических размеров A_1 заготовок. В этом случае размер a_y отражает несовпадение поверхности *4* заготовки с установочной поверхностью E приспособления в направлении оси Z, размер $a_б$ – несовпадение измерительной поверхности *3* с установочной поверхностью *4* заготовки. Сумма рассеивания этих составляющих размеров в партии заготовок определяет возможность выполнения операционного размера A_1 и заданного допуска T_1, а поле рассеивания суммарной составляющей – возможность выполнения данной операции в автоматическом режиме.

Пример 2.1. *Даны операционные размеры:* $A_1 = 20 \pm 0{,}1$ мм ($T_1 = 0{,}2$); $A_2 = 20 \pm 0{,}1$ мм ($T_2 = 0{,}2$).

Известно также, что $a_y = 0 + 0{,}1$ мм, $a_б = 20 \pm 0{,}2$ мм.

Значения размеров $a_{o1} = 40{,}05$ мм и $a_{o2} = 60{,}05$ мм приняты постоянными.

Требуется установить возможность выполнения заданных операционных размеров A_1 и A_2 в автоматическом режиме на настроенном станке.

Общее уравнение размерной цепи, в которой операционный размер A_1 является замыкающим звеном, имеет вид:

$$A_1 - a_{o1} + a_y + a_б = 0,$$

тогда уравнение замыкающего звена равно:

$$A_1 = a_{o1} - a_y + a_б.$$

Из этого уравнения определим возможные значения анализируемого операционного размера A_1, которые будут определять их соответствие заданным значениям допустимых операционных размеров ($A_{1max} = 20{,}1$ мм, $A_{1min} = 19{,}9$ мм).

$$A_{1max} = a_{o1\,max} - a_{y\,min} - a_{б\,min} = 40{,}05 - 0 - 19{,}8 = 20{,}25 \text{ мм};$$

$$A_{1min} = a_{o1min} - a_{y\,max} - a_{бmax} = 40{,}5 - 0{,}1 - 20{,}2 = 19{,}75 \text{ мм}.$$

Поле рассеивания $\omega_{A1} = A_{1max} - A_{1min} = 20{,}25 - 19{,}75 = 0{,}5$ мм.

Таким образом, заданное значение допуска $T_1 = 0{,}2$ мм будет нарушаться при изготовлении, и значительная часть заготовок при обработке окажется бракованной.

Операционный размер A_2 в нашем примере будет выполнен с идеальной точностью, так как ожидаемые значения этого размера:

$A_{2max} = A_{2min} = a_{o2} - a_{o1} = 60{,}05 - 40{,}05 = 20$ мм, т.е. $\omega_{A2} = 0$.

Из примера видно, что от способа задания операционных размеров, от выбора базовых установочных и измерительных поверхностей заготовок зависит возможность применения метода автоматического получения показателей качества. Данный метод обеспечивает высокую производительность труда на операции.

Изменив базирование заготовки или простановку операционного размера A_1, можно создать условия для выполнения заданного значения операционного размера в пределах допуска T автоматически, на настроенном оборудовании.

Часто при изготовлении различных заготовок такие изменения по различным причинам невозможны. В этих случаях может быть использован третий метод достижения точности – комбинированный.

Комбинированный метод достижения заданной точности параметров заготовок используется в тех случаях, когда невозможно получить один или несколько операционных размеров автоматически на настроенном оборудовании. Для применения этого метода могут быть использованы станки с «плавающим нулем». Станки с ЧПУ такого типа позволяют часть размеров (чаще всего это один операционный размер) обеспечить методом пробных проходов и промеров, а множество остальных параметров, которые создают ***внутрикомплексную связь*** (в пределах одной операции) поверхностей выполнить обработкой по программе для станка с ЧПУ.

Пример 2.2. Для примера 2.1 это обеспечивается следующим образом: при подрезке торца *1* (см. рис. 2.2) заготовки используется метод пробных проходов и промеров. После достижения случайного, но допустимого значения операционного размера A_1 фиксируется «плавающий ноль» станка (система «обнуляется»). Дальнейшая обработка комплекса поверхностей заготовки осуществляется по программе в координатной системе, нулевая «плавающая» координатная точка которой находится на поверхности *1* заготовки.

Комбинированный метод достижения заданной точности параметров заготовок не обеспечивает полной автоматизации получения операционных размеров, но решает значительную часть задач, которые возникают в авиационном двигателестроении.

2.3. СТРУКТУРНО–ЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Обеспечение показателей качества изделия (ПКИ) – одна из важнейших задач, решаемых на этапах конструирования и разработки технологических процессов производства. Направления совершенствования процессов изготовления ГТД и использование прогрессивных методов достижения точности параметров заготовок на современном оборудовании требует оптимальной взаимосвязи параметров для различных уровней производства с целью обеспечения показателей качества изделий при экономически выгодных вариантах производства.

Выполнение этого условия обеспечивается на основании глубоких исследований и конструкторско-технологической проработки изделия.

В процессе проектирования определяются оптимальные формы деталей, обеспечивающие наибольшую долговечность. Точность выполнения параметров деталей и сборочных единиц должна быть экономически целесообразной и обеспечивать надежную работу всего изделия в

целом. Функциональные связи ПКИ с технологическими параметрами определяются согласно структурно-логической схеме (рис. 2.3). В этой схеме можно выделить несколько уровней конструкторской и технологической сфер реализации функциональных связей [10].

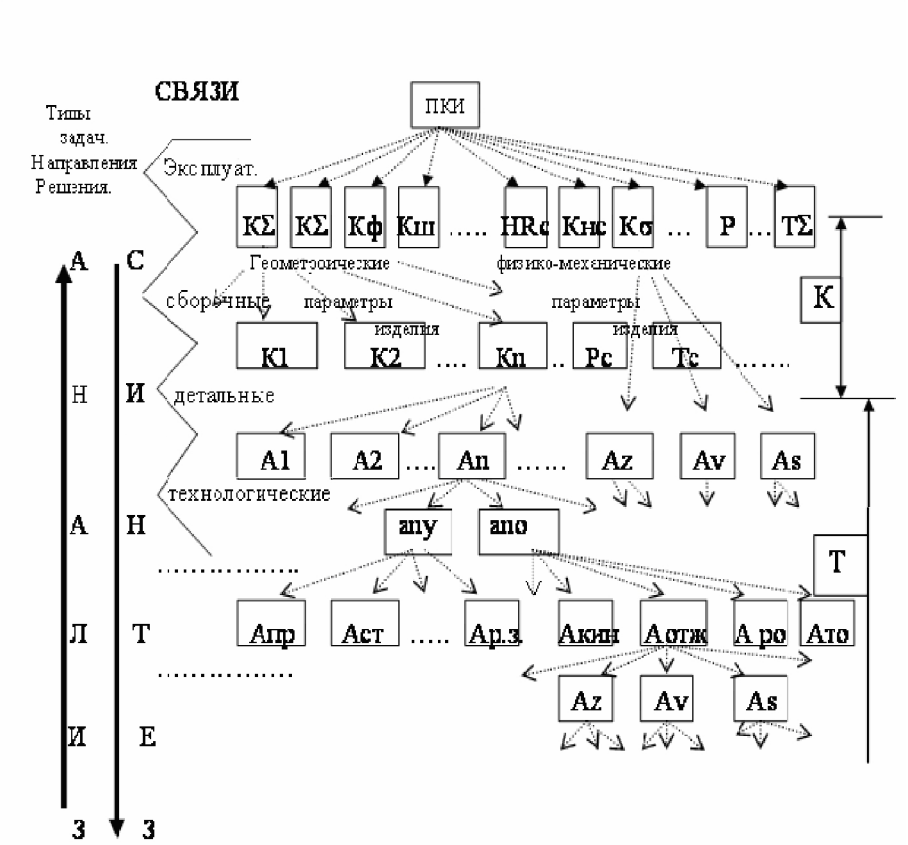


Рис. 2.3. Структурно-логическая схема обеспечения показателей качества изделия (ПКИ)

Эксплуатационные связи (уровень 1) характеризуют обеспечение основных параметров изделия. Эти характеристики зависят от геометрических, физико-механических, химических и других параметров изделия, а также от параметров, которые воздействуют на изделие в процессе его эксплуатации.

К *геометрическим параметрам изделия* относятся осевые и радиальные зазоры в соединения и передачах (K_Σ , $\overline{K}_\Sigma$), отклонение формы ($K_ф$) поверхностей проходных сечений в изделии, шероховатости ($K_ш$) рабочих и конструкторских поверхностей и т. д.

Физико-механические параметры изделия определяются твердостью HRC деталей, глубиной наклепанного слоя ($K_{нс}$), остаточными напряжениями ($K\sigma$) в поверхностном слое детали и т.д.

Химические параметры изделия отражают состав материала и сплавов, структуру и свойства основного материала и материала покрытия и т.д.

Силовые P и температурные T факторы – силы и перемещения элементов, возникающие при эксплуатации и нагреве изделия.

Значение параметров представленного уровня и их взаимодействие в процессе эксплуатации определяют характеристики и стабильность ПКИ во времени.

Сборочные связи (уровень 2) характеризуют обеспечение выходных параметров изделия в процессе сборки. В структурно-логической схеме на рис. 2.3 рассмотрена одна из веток обеспечения основных геометрических размеров (K_Σ) сборочных связей. Она показывает, что выполнение данного размера зависит от геометрических параметров деталей, входящих в сборочную единицу (K_1, K_2, K_3,...,K_n), а также от других факторов, воздействующих на детали в процессе сборки. Эти воздействия проявляются как силовые P_c (силы затяжки соединений, запрессовки деталей и т.п.) и температурные T_c (нагрев или охлаждение деталей в процессе сборки).

Детальные связи (уровень 3) дают возможность вскрыть существующие связи между конструкторскими и технологическими операционными размерами. Они отражают особенности построения технологических процессов изготовления деталей и способы обеспечения требований, заданных в чертеже.

Связи в технологической системе (уровень 4). На этом уровне выделяются основные параметры, связанные с установкой, обработкой и базированием ($a_{пу}$, $a_{по}$, $a_б$) заготовки. Применение технологических

схем обработки [11] определяет качественное выполнение заданных операционных размеров (A_n) деталей.

Рассматривая следующий уровень связей ПКИ, можно обнаружить, что размеры, определяющие установку заготовки (a_{ny}), находятся в непосредственной связи с применяемой оснасткой (A_{np}) и оборудованием (A_{cm}), с их точностью и жесткостью, с режимами резания A_{p3}. Остаточные изменения геометрических параметров, связанные с процессом обработки ($a_{по}$), зависят от кинематической точности применяемого оборудования ($A_{кин}$), величины отжатия ($A_{отж}$), имеющей место в процессе обработки заготовки, износа режущего инструмента и оборудования и т. д.

Рассматривая ветку структурно-логической схемы параметра отжатия ($A_{отж}$) элемента заготовки в процессе обработки, видим, что он находится в непосредственной связи с величиной удаляемого припуска металла, режимов обработки (A_z,A_v,A_s) в данной операции и других факторов.

Если рассмотреть функциональные связи физико-механических или химических параметров деталей, то можно заметить подобную тенденцию образования уровней связей.

Структурно-логическая схема показывает неразрывность связей показателей параметров качества всех уровней с выходными ПКИ и вскрывает сферы реализации конструкторско-технологических разработок.

Задачи конструкторской сферы реализации заключаются в определении параметров изделия с целью получения необходимых показателей качества.

Задачи технологической сферы реализации заключаются в выполнении данных параметров на основе расчета и правильного построения технологических процессов.

Первый и второй этапы сферы реализации представляют соответственно движение от общего к частному (задачи синтеза) и, обратно, от частного к общему (задачи анализа). При решении задач синтеза для любого параметра назначаются допустимые границы (допуски T), детерминированные условиями обеспечения ПКИ.

При анализе качественных показателей различных уровней производства изделий по имеющимся (ранее разработанным) составляющим параметрам и допускам на них определяются возможные значения выходных ПКИ в виде полей рассеивания ω.

Величина, устанавливающая соотношение между полем рассеивания ω и допуском Т, является показателем точности протекающего процесса [12,13]. Это – **коэффициент точности**

$$K_m = \omega / \mathrm{T}.$$

Коэффициент точности определяется на основании статистического анализа точности технологических процессов. В качестве нормативных значений применяются следующие его значения:

$0{,}3 \le K_т \le 0{,}5$ при обработке на новом оборудовании, которое по точности значительно превышает необходимую;

$0{,}5 \le K_т \le 0{,}75$ при обработке на оборудовании, которое находится в хорошем состоянии и имеет нормальный запас точности;

$0{,}75 \le K_т \le 0{,}95$ при обработке на оборудовании и оснастке, находящейся в нормальном состоянии, с малым запасом точности;

$0{,}95 \le K_т \le 1{,}05$ при обработке на оборудовании и оснастке с отсутствием запаса точности и при экономически оправданном небольшом уровне брака.

В работах [14-16] дана унификация методов оценки точности отдельных технологических процессов и суммирования составляющих элементов для различных видов размерных связей. Помимо случайных погрешностей обработки, соединения и сборки элементов изделий, суммирование которых осуществляется в соответствии с вероятностными моделями, на поле рассеивания ω выходных характеристик влияют следующие факторы:

смещение математического ожидания под действием систематических факторов (систематическое смещение при настройке, износ рабочих инструментов, изменение температуры технологической системы, износ установочных элементов и т.д.);

рост поля рассеивания случайной величины от действия как систематических (динамическая расстройка технологической системы), так и случайных факторов.

Такой способ оценки точности позволяет более достоверно определять происходящие процессы при изготовлении или назначении оптимальных составляющих параметров для производства.

2.4. ФОРМИРОВАНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНОГО ПЛАНА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Разработка технологического процесса изготовления деталей является наиболее важной частью создания высококачественного изделия и экономически обоснованного производства.

Для производства деталей приняты следующие основными этапы обработки:

1) подготовительный;
2) черновой;
3) получистовой;
4) чистовой;
5) окончательный, отделочный.

В процессе выполнения механической обработки по мере необходимости производятся различные термические и термохимические операции с целью создания у заготовок необходимых качественных показателей. Кроме того, заготовки в процессе обработки подвергаются периодическому контролю и выполнению различных видов упрочняющих и отделочных операций.

Количество этапов обработки и применение различных операций зависит:

от конструктивных особенностей и требований к деталям;

применяемого материала;

качества выполнения исходной заготовки;

применяемых средств производства и других факторов.

Для определения количества этапов обработки и их последовательности выполнения необходимо иметь численную оценку процесса обработки. Эту оценку можно дать на основании ***коэффициента уточнения E***, который рассчитывается как отношение допусков заготовки к допускам готовой детали для каждой поверхности детали:

$$E = T_{заг} / T_{г.д};$$

где $T_{заг}$ – наибольший допуск исходной заготовки; $T_{г.д}$ – наименьший допуск готовой детали.

Разделение технологического процесса на этапы и выполнение их в порядке возрастания точности обеспечивают наиболее качественную и производительную обработку заготовок. Основные этапы обработки в порядке возрастания точности заготовок представлены в табл. 2.1,в основном для деталей, подвергающихся механической обработке резанием.

Таблица 2.1 – Основные этапы обработки в порядке возрастания точности заготовок

Параметр	Значение												
Поле допуска отверстия, вала	- 5	H6 6	H7 7	H8 -	H9 8	- -	H10 10	H11 11	- -	H12 12	- -	H14 14	H15 15
Квалитет	5	6	7	8		9	10	11	12	-	13	14	15
Число единиц допуска, мкм	7	10	16	25	30	40	64	100	160	200	250	400	640
E_j при j : … n $n+1$ … … … … $m-1$ m … …	1,43		1,6	2,5			4,0			4,0			
Этапы обработки	Окончательный отделочный			Чистовой			Получистовой			Черновой и подготовительный			

Текущий коэффициент уточнения E_j определяется тождественным равенством:

$$\text{Å}_m = \prod_{J=n}^{m} pE_n \cdot \text{Å}(n+1) \cdot \ldots \cdot E(m-1) \cdot E_m .$$

Коэффициент уточнения E_j зависит:

от способов получения заготовок;

технических требований, применяемых к деталям;

особенностей применяемых методов обработки, их места в технологическом процессе и других факторов.

Этот коэффициент меняется в значительных пределах (от $j = n$ до $j = m$).

Если исходная заготовка будет иметь невысокую точность, например, она получается методом свободной ковки, то количество этапов механической обработки для достижения необходимой точности у детали будет больше, чем при использовании исходной заготовки, выполненной более точным методом, например штамповкой в открытых штампах.

Способ получения исходной заготовки определяет необходимость создавать напуски, увеличивать расчетные припуски на заготовках, выполнять сложные операции, связанные с выверкой их в процессе подготовки установочных базовых поверхностей.

Таким образом, количество этапов обработки зависит от точности заготовок на различных этапах производства (включая получение исходной заготовки).

Пример 2.3. *Определить*, как изменится число этапов обработки, если допуски на один из элементов заготовки будут разные.

1. Первая заготовка имеет допуск на один из параметров $T_{заг}$ = 0,64 мм (невысокая точность).

2. Вторая заготовка получена более точным методом. На рассматриваемый параметр допуск – $T_{заг}$ =0,16 мм.

Для достижения точности у готовой детали с допуском $T_{г.д}$ = 0,025 мм для рассматриваемого элемента детали потребуется различное количество этапов механической обработки.

В первом случае расчетный коэффициент уточнения будет равен:

$$E_{1р} = T_{заг}/T_{г.д} = 0{,}64/0{,}025 = 25{,}5,$$

т.е. рекомендуемое число этапов обработки в соответствии с табл. 2.1 находится между значениями $E_1 = 4 \times 4 = 16$ и $E_1 = 4 \times 4 \times 2{,}5 = 40$.

В этом случае, для достижения заданной точности необходимо выполнить три этапа обработки:

1) черновой;
2) получистовой;
3) чистовой.

Во втором случае коэффициент уточнения

$$E_2 = T_{заг2}/T_{г.д} = 0{,}16/0{,}025 = 6{,}4,$$

т.е. рекомендуемое число этапов обработки находится между

$$E_1 = 4 \times 2{,}5 = 10 \text{ и } E_1 = 4.$$

В этом случае, для достижения заданной точности необходимо выполнить два этапа обработки:

1) получистовой;
2) чистовой.

Очевидно, что чем точнее обеспечиваются параметры заготовок (включая исходные заготовки), тем меньше необходимо предусматривать этапов механической обработки для различных поверхностей.

Совершенствование процессов производства направлено на улучшение методов обработки, оснастки и средств производства, что приводит к сокращению количества этапов обработки. Так, при обработке лопаток турбины, которые имеют сложную пространственную форму пера и изготавливаются из труднообрабатываемого хромоникелевого сплава (коэффициент обрабатываемости лезвийным инструментом для такого материала равен K=0,02), обеспечивают получение исходной заготовки с точностью профиля пера, равной заданным допускам в чертеже готовой детали.

Коэффициент уточнения в этом случае E=1. При такой исходной заготовке механическая обработка по перу лопатки считается ненужной.

Создание таких технологических процессов изготовления деталей ГТД является весьма сложным. Качество деталей в этом случае зависит от технологических процессов заготовительного и основного производств.

Увеличение требований к сбалансированности деталей и сборочных единиц ГТД для роторной части двигателя (ротора компрессора, ротора турбины, валов и т.п.) вызывает необходимость применять различные

технологические приемы, которые позволяют в процессе механической обработки заготовок уменьшить производственные погрешности, влияющие на дисбаланс роторов. В связи с этим на различных этапах обработки деталей для повышения точности используют высокоточную установочную (оптимальную) схему обработки и точные измерительные устройства.

Смещение элементов деталей роторной части двигателя (диски компрессора и турбины, валы, соединительные и уплотняющие кольца и т.д.) в радиальном и осевом направлениях относительно конструкторских поверхностей приводит к неуравновешенности масс. Эта неуравновешенность проявляется по всему тракту двигателя и ее устранение на этапе обработки является весьма важной задачей. Уменьшение исходной неуравновешенности для гибких роторов компрессора и турбины является решающей при создании качественных ГТД. Методы статической и динамической балансировки, которые используются для отдельных деталей и сборочных единиц, не позволяют полностью устранить эту неуравновешенность. Скрытая неуравновешенность роторов при эксплуатации двигателей приводит к появлению повышенной вибрации. Такое положение обуславливает необходимость на этапе механической обработки деталей роторной группы двигателя уменьшать влияние источников неуравновешенности.

Так, для свободных поверхностей дисков и валов, от которых не требуется высокая точность самих поверхностей, требование по расположению этих поверхностей относительно конструкторских баз возрастает многократно. Для свободных поверхностей дисков и валов ГТД при окончательной обработке обеспечивают взаимное их биение в пределах 0,03…0,05 мм. Это условие выполняется за счет уменьшения количества установок заготовок в технологической системе при обработке. Обработка множества поверхностей с одной установки часто усложняет производство, но позволяет повысить точность расположения обрабатываемых поверхностей относительно друг друга.

Необходимо отметить, что детали турбины ГТД работают при высоких температурных режимах эксплуатации. Перепад температур в различных зонах отдельной детали двигателя достигает 400°С. Это требует в процессе изготовления деталей тщательной защиты поверхностей. Для защиты поверхностей используют гальванические покрытия, ионо-

плазменное напыление, специальные термобарьерные керамические покрытия и т.п.

С целью повышения качества поверхностей и увеличения ресурса работы деталей ГТД в поверхностном слое создаются оптимальные сжимающие напряжения различными упрочняющими методами такими, как гидродробеструйная, пневмодробеструйная, абразивно-жидкостная обработка, алмазное выглаживание поверхностей, выглаживание шариками или роликами, применение лазерной обработки т.п.

Высокие требования к качеству материала деталей и к поверхностям соединений определяют необходимость применения различных видов контроля в технологическом процессе изготовления: люминесцентного, рентгеновского и других видов проверки материала обеспечивает качество.

Данные условия усложняют производство деталей ГТД, увеличивают количество операций в технологическом процессе и вызывают необходимость применять специальные технологические приемы. Без учета увеличивающихся требований к современным ГТД невозможно в настоящее время создать качественные и конкурентоспособные изделия.

В табл. 2.2 представлены возможные изменения в основных этапах обработки для различных поверхностей деталей в связи с особенностями изготовления сложных элементов ГТД.

Таблицы 2.2 – Возможные изменения в основных этапах обработки различных поверхностей деталей

Этап			Назначение и характер этапа
Номер	Составляющие	Наименование	
1	1	Подготовительный	Обработка поверхностей для технологических базовых поверхностей
2	2	Черновой	Съем напусков и припусков, вызванных особенностью получения исходной заготовки. Точность размеров обеспечивается в пределах IT12....IT14,формы и расположения – X...XII степени; *Rz* = 20…80 мкм
	3	Термический 1	Снятие внутренних напряжений.

Продолжение табл. 2.2

Этап			Назначение и характер этапа
Номер	Составляющие	Номер	
3	4	Получистовой 1	Восстановление баз и получистовая обработка основных поверхностей. Точность размеров обеспечивается в пределах IT 10...IT12, формы и расположения VIII....IX; *R*z = 10 и выше
	5	Термическая 2	Улучшение качества средних и поверхностных слоев материала заготовки, цементация
	6	Получистовая 2	Съем цементационного слоя на поверхностях, предохраняемых от цементации. Обработка второстепенных поверхностей. Обработка основных поверхностей
	7	Термическая 3	Закалка, отпуск
4	8	Чистовой 1	Восстановление баз, чистовая обработка. Точность размеров IT8...IT9, формы, расположения VI...VII степени, R_z = 3,2...6,3 мкм; *R*a = 0,63...1,25мкм
	9	Термический 4	Азотирование, старение
	10	Чистовой 2	Шлифование поверхностей, предохраняемых от азотирования
	11	Чистовой 3	Правка баз, чистовая обработка основных поверхностей. Точность размеров IT8…IT9, формы и расположения IV...VII, степени, *R*z =3,2...6,3 мкм; *R*a= 0,63...1,23
	12	Гальванический	Хромирование, никелирование и др.
5	13	Отделочный	Доводка главных поверхностей, точность размеров IT5...IT7, формы расположения IV...V степени, *R*z=0,8...1,6 мкм; *R*a=0,16...0,32 мкм
	14	Контрольный	Окончательный контроль

ГЛАВА 3
ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛОПАТОК

3.1. КОНСТРУКЦИЯ, ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ И МАТЕРИАЛЫ

Рабочие (вращающиеся), направляющие, спрямляющие и сопловые (неподвижные) лопатки ГТД могут быть сплошными, с каналами охлаждения и пустотелыми. В зависимости от назначения и условий работы лопатки изготовляют горячей штамповкой, прессованием, прокаткой, вальцеванием из заготовок, полученных методом направленной кристаллизации или монокристаллизации металла при литье, методом сварки и пайки, а также из композитных материалов.

Основными конструктивными элементами лопаток являются:

замковая часть;

перо лопатки;

бандажные полки.

Крепежным элементом у лопаток служит замковая часть, поверхности которой являются конструкторскими, определяющими положение лопаток в сборочной единице. Рабочие лопатки компрессорной группы выполняются трапецеидальной формы (типа ласточкина хвоста) или в виде вильчатого замка.

У рабочих лопаток турбины замковая часть выполняется в виде елочного замка, который обеспечивает необходимые показатели прочности и точности соединения лопаток с диском.

Замки Т-образной формы и бульбового типа используются у лопаток турбонасосных агрегатов.

В связи с тем, что поверхности замковой части являются конструкторскими и определяют «ось детали», точность этих поверхностей обеспечивается, как правило, в пределах IT5-IT6.

3.1.1. Замки лопаток

Елочный замок (рис. 3.1, а). Для лопаток газовой турбины часто применяют замок елочного типа компактной формы, который и обеспечивает точное и надежное соединение лопаток с диском турбины.

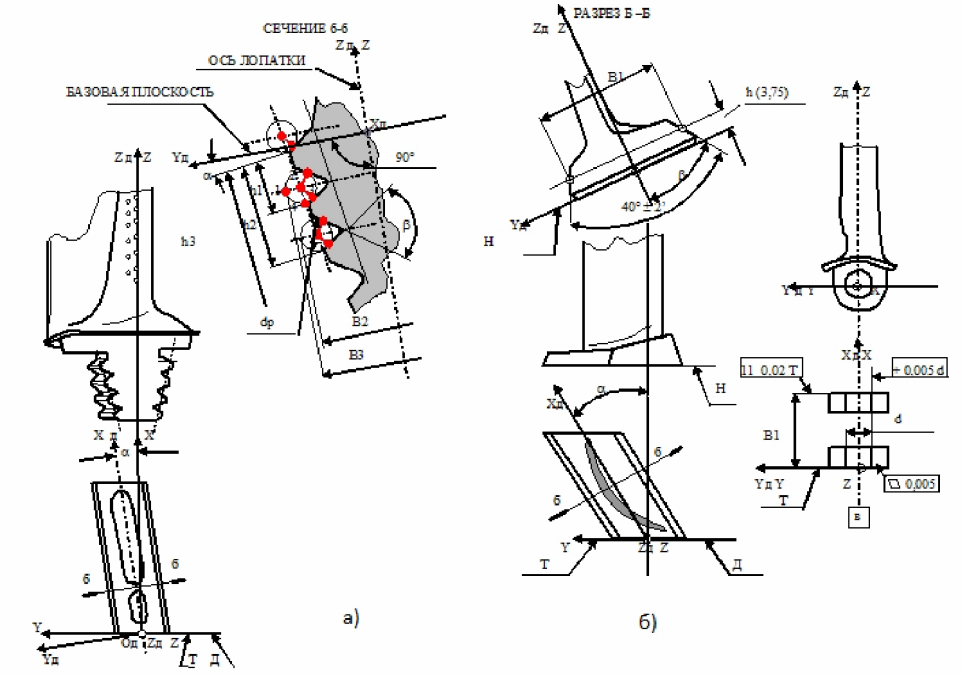


Рис. 3.1. Замковые части лопаток и их основные параметры:
а – елочный замок; б – замок трапецеидальной формы; в – вильчатый замок

Профиль зубцов замка напоминает профиль упорной резьбы равнопрочной конструкции. Поверхности замка определяют расположение лопатки в диске и создают координатную систему детали $X_д Y_д Z_д$.

Радиальное ориентирование лопатки в сборочной единице (в колесе турбины) в направлении оси $Z_д$ определяют поверхности профиля зуба замка. Базовая плоскость $X_д O_д Y_д$ находится, как правило, на первом зубце елочного замка. Этот элемент лопатки обеспечивает ориентирование в радиальном (ось $Z_д$) и в поперечном (ось $Y_д$) направлениях относительно паза диска.

Осевое положение лопатки в диске определяется торцевой поверхностью Т замка, которая в сборочной единице совпадает с торцевой поверхностью Д диска. В этой плоскости находится начало координатной системы (точка $O_д$) детали. Ось $X_д$, которая формализована элементами елочного замка, может быть параллельна оси диска или повернута (см. рис. 3.1,а), на угол α.

В поперечном сечении б-б замка контролируются основные геометрические параметры профиля: косвенно с использованием специальных игл (роликов) диаметры которых обеспечивают контакт с профилем в средней части, в точках 2 и 3 замка.

Основные параметры профиля замка в поперечном и в продольном направлениях имеют:

1) допуск на толщину замка (размеры B_1, B_2,…, $B_п$) 0,02…0,06 мм. Контроль осуществляется в точке 1 перпендикулярно плоскости, в которой находится ось замка (ось лопатки);

2) допуск на шаг зубьев (размеры h_1, h_2,..., $h_п$) 0,008…0,02 мм. Контроль осуществляется в точках 4 роликов в направлении образующей конуса замка;

3) допуск на возможное смещение профилей левой и правой части замка относительно друг друга 0,008…0,02 мм. Данный параметр контролируется параллельно оси $Z_д$ лопатки;

4) допуск на угол β (56°) профиля впадины 5…30′.

5) допуск на угол γ(10°), определяющий положение оси впадины к оси замка 5′-20′.

6) шероховатость конструкторских поверхностей замка Rz = = 0,16…0,32 мкм.

7) на образующей поверхности замка лопатки необходимо создать сжимающие напряжения.

Замок трапецеидальной формы (рис. 3.1,б). Большое распространение получило крепление лопаток в диске с помощью трапецеидального паза – «ласточкин хвост». Замковая часть лопатки устанавливается в паз диска с зазором 0,01…0,04 мм. В отдельных случаях для повышения собственной частоты колебаний лопаток [1] посадка стальных лопаток в диски производится с натягом до 0,015 мм с использованием медного слоя (0,003 … 0,005 мм) для запрессовки.

Допуски на основные параметры профиля замка имеют следующие значения:

1) 0,02…0,03 мм на толщину замка (размер B_1) в среднем сечении, расположенном относительно опорной поверхности на расстоянии h (h =3,75 мм);

2) 3…5′ на угол профиля замка угол α;

3) 2…3′ на угол β, определяющий положение образующей замка относительно опорной поверхности H;

4) 0,003 мм на опорную поверхность H (проверить по краске прилегание 60…80%).

5) Rz = 0,16…0,32 мкм конструкторских поверхностей.

Положение оси $X_д$ замка относительно оси диска может быть, повернуто к оси X (угол $\alpha = 30^\circ$). В отдельных случаях используют поворот оси замка относительно оси Z. Эти повороты создают пространственное ориентирование лопатки в роторе компрессора, обеспечивают необходимое положение центра тяжести относительно диска и оптимальное положение входного профиля пера.

Вильчатый замок (рис. 3.1,в). На некоторых ступенях осевых компрессоров применяется вильчатый, шарнирный способ крепления лопаток. Он позволяет устанавливать лопатку в плоскости вращения так, что под действием на нее газодинамической силы и силы инерции лопатка покачивается на шарнире, обеспечивая оптимальное положение пера в рабочем потоке.

Допуски на основные параметры профиля замка имеют следующие значения:

1) 0,011 мм на посадочный диаметр d;

2) 0,005 мм на соосность посадочного диаметра;

3) 0,01 мм на перпендикулярность конструкторской поверхности K_1 относительно посадочного диаметра d;

4) 0,005 мм на опорную плоскость T;

5) 0,02 мм на параллельность торцевых опорных плоскостей поверхностей;

6) $Rz = 0{,}16…0{,}32$ мкм конструкторских поверхностей.

Представленные значения параметров замка лопаток роторной части ГТД контролируются универсальными и специальными измерительными средствами. Использование координатно-измерительных машин (КИМ) с ЧПУ также позволяет осуществлять контроль лопаток и оснастки. Для этого необходимо задать траекторию движения датчика машины и обеспечить его контакт в заданных конструкторских точках лопатки.

Конструкторские поверхности лопаток создают координатную систему $X_дY_дZ_д$, которая совмещается с координатной системой рабочих элементов диска в процессе сборки.

Необходимо отметить, что при ориентировании детали в пространстве требуется минимально необходимое, но достаточное количество конструкторских поверхностей, которые обеспечивают правильное (точное) положение детали в сборочной единице. Комплекс конструкторских поверхностей определяет положение лопаток в дисках компрессора или турбины. Набор этих поверхностей обеспечивает необходимое положение плоскостей координатной системы $X_дY_дZ_д$. Начало координатной системы лежит в точке 0. Ориентирование в направлении оси X осуществляется в процессе сборки лопаток с колесом компрессора или турбины. Это ориентирование выполняется с помощью фиксатора или другого специального сборочного элемента.

В связи с особенностями работы ГТД и его элементов, исходя из условий прочности и долговечности изделия конструктор в отдельных случаях увеличивает количество конструкторских поверхностей, нарушая правило о минимальной необходимости и достаточности их числа у детали. Например, у трапецеидального замка лопатки компрессора имеется минимально необходимое и достаточное количество конструкторских поверхностей. У елочного замка турбинной лопатки число конструкторских поверхностей значительно больше необходимого.

Обеспечивая компактность конструкции и прочностные характеристики соединения, принимается более сложная схема расположения конструкторских поверхностей и увеличивается их количество. Этот прием позволяет обеспечить качественные показатели изделия по прочности соединения, но несколько усложняет производство.

3.1.2. Перо лопатки

Поверхности пера лопатки являются рабочими, к ним предъявляют высокие требования по точности геометрических параметров и шероховатости поверхностей.

Рассмотрим на примере первой ступени лопатки турбины способы назначения размеров и технических требований для ориентирования пера лопатки относительно конструкторских поверхностей (поверхностей замка лопатки). На рис. 3.2 представлена координатная система XYZ. Плоскость XZ совпадает с плоскостью вращения турбины. Плоскость YZ совпадает с торцевой поверхностью Д диска турбины, относительно которой фиксируется осевое положение лопатки в процессе сборки. В то же время эта плоскость является торцевой поверхностью *Т* замка лопатки.

В такой конструкции лопатки плоскость симметрии замка повернута относительно плоскости XZ на угол α. От этой плоскости $X_дY_д$ в процессе изготовления осуществляется контроль выполнения основных геометрических параметров пера лопатки. В координатной системе $X_дY_дZ_д$ задаются в поперечных (I-I, II-II, III-III) и в продольных сечениях (1-1, 2-2, 3-3) номинальные размеры точек на корыте и спинке лопатки (табл. 3.1).

Таблица 3.1. – Пример задания номинальных размеров точек на корыте (К) и спинке (С) лопатки турбины

Сечение поперечное	О – О		1 – 1		2 – 2		3 – 3 ...	
	К	С	К	С	К	С	К	С
I – I	…	…	…	…	…	…	…	…
II – II	–	-	– 2,25	– 9,72	– 3,64	-11,49	– 3,88	-11,01
III – III	…	…	…	…	…	…	…	…
.... –	…	…	…	…	…	…	…	…

В такой таблице можно задать номинальные значения всех точек профиля пера лопатки. В табл. 3.1 показаны значения только для одного поперечного сечения II-II, ось координатной системы XY которой совпадает с центром тяжести лопаток.

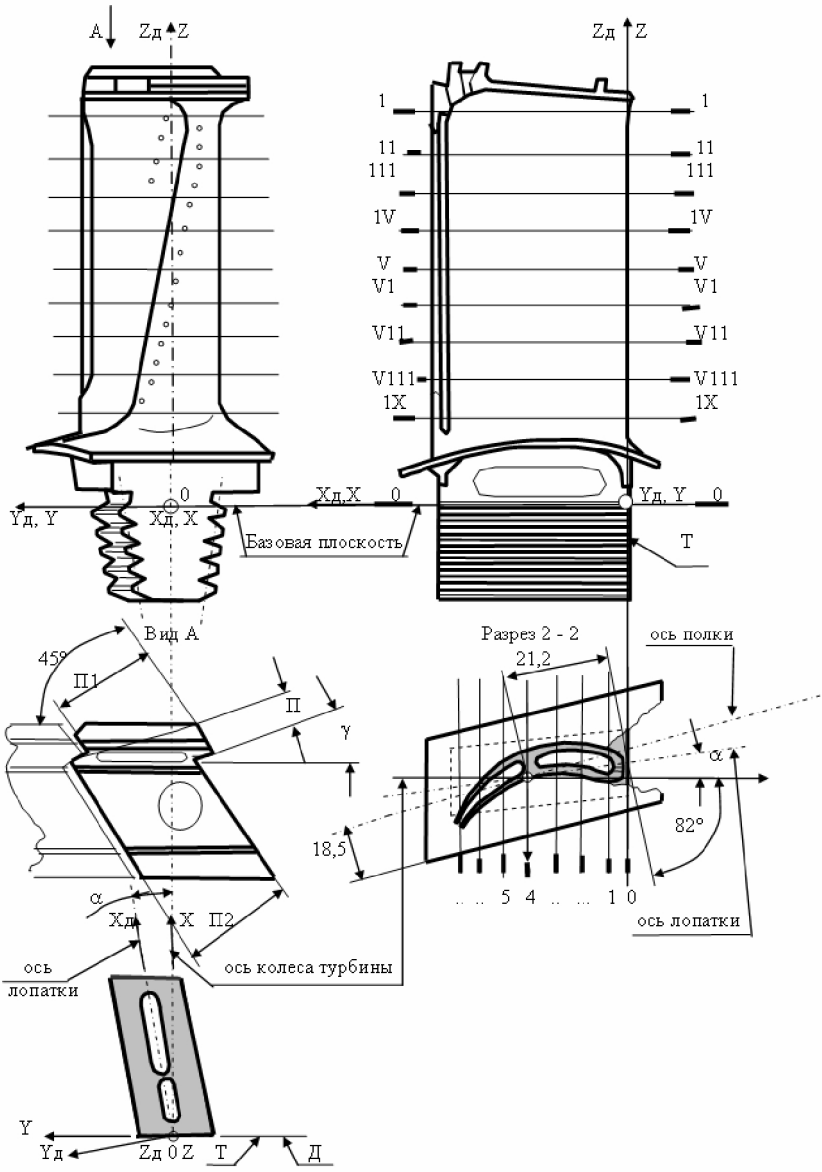


Рис. 3.2. Координатная система ориентирования лопатки первой ступени турбины

При этом допуск на отклонение профиля пера лопатки относительно заданных номинальных значений – 0,1…0,2 мм (для лопаток средних размеров).

При обработке пера лопатки необходимо обеспечивать плавность переходов в сечениях.

Для удобства измерения профиля пера лопатки, или исходя из других условий координатная система измерения $X_и Y_и$ может быть перенесена в точку $О_и$ центра тяжести лопатки.

Подобный способ задания основных параметров рабочих поверхностей профиля применяется для лопаток компрессора, соплового и направляющего аппаратов и других деталей ГТД подобного типа.

Допуски на другие параметры профиля рабочих поверхностей пера лопатки следующие:

0,1 … 0,4 мм на толщину входной кромки;

30′ на угол закрутки пера в поперечных сечениях;

0,2 … 0,3 мм на радиус входной кромки пера;

0,5 … 0,7 мм на радиус перехода пера к бандажным полкам;

Ra =1,25 … 2,5 мкм профиля пера лопатки.

Важной характеристикой при эксплуатации лопаток турбины является также толщина стенки между наружным контуром профиля пера и внутренней полостью охлаждения.

Допуск на смещение внутреннего контура относительно наружного 0,2…0,3 мм.

Кроме выполнения показателей качества рабочей поверхности пера лопатки, необходимо создать термобарьерное керамическое покрытие толщиной 250 мкм.

3.1.3. Бандажные полки

Современные ГТД отличаются большим разнообразием конструктивного исполнения бандажных полок лопаток компрессора и турбины. Они позволяют повысить прочностные характеристики отдельных элементов конструкции, улучшить условия защиты от вибрации и увеличить показатели экономичности изделий. Бандажные полки также позволяют оптимизировать градиент температур в поперечном сечении двигателя.

На рис.3.2 (вид А) представлена конструкция верхней бандажной полки лопатки турбины. Сложный профиль полки обеспечивает при сборке колес турбины замкнутый контур бандажного обода, который

улучшает показатели прочности и экономичности изделия. Соединение элементов бандажных полок предусматривает различные требования.

В средней части между полками необходимо обеспечить переходную посадку в соединениях; в крайних зонах бандажных полок необходимо создать соединения с гарантированными зазорами.

В связи с этим, точность между стыковыми полками лопатки (размер *П*), выполняется в пределах IT5…IT6. Расположение этих поверхностей относительно замка лопатки также обеспечивается с высокой точностью, так как эти параметры непосредственно оказывают влияние на поворот лопаток в диске, который зависит от момента сил, возникающих при сборке колеса турбины. Малый угол наклона стыковых поверхностей ($\gamma = 4…5°$) к плоскости вращения турбины обеспечивает небольшой поворот лопаток относительно своих осей и создает плотное соединение в бандажном венце со следующими допусками:

1) 0,03…0,05 мм на размер *П*;

2) 0,08…0,1 мм на размеры $П_1$, $П_2$;

3) 10′ на угол γ (4°30′);

4) 0,01 мм на поворот лопатки относительно оси *Z* при сборке колеса турбины. Этот поворот контролируется на длине 30 мм.

Подобные требования предъявляются к нижним замковым полкам (разрез VIII – VIII) и средним бандажным полкам, которые чаще используются в роторах компрессора и у вентиляторных лопаток.

На верхних бандажных полках лопаток размещаются специальные уплотнительные элементы (гребешки), которые уменьшают перетекание газа в турбине по лабиринтному уплотнению. Этот элемент конструкции выполняется в пределах IT-5 и выше. Сложность выполнения элементов уплотнения часто вызывает необходимость производить обработку данных поверхностей после сборки лопаток с технологическим диском турбины.

Из дополнительных требований к лопаткам ГТД можно отметить следующие. Допуск на массу каждой рабочей лопатки устанавливают до 5% номинального значения. В процессе сборки колеса турбины осуществляют распределение лопаток по массе исходя из оптимальной схемы расположения их в колесе турбины. Разность масс при этом составляет 2 г.

После сборки колесо турбины подвергают статической балансировке. На этапе сборки ротора турбины проводится статическая и динамическая балансировки сборочной единицы.

Для рабочих лопаток турбины ГТД устанавливается также нижний допустимый предел частот первой изгибной формы колебаний. В установившемся серийном производстве лопатки компрессора периодически испытывают на усталость на вибростендах.

3.1.4. Материал лопаток

Лопатки роторной и статорной части ГТД работают в различных температурных условиях.

На входе в компрессор температура находится в пределах –50° …–60°С, в зоне последних ступеней компрессора высокого давления он достигает 600…700°С. На лопатки ротора и статора компрессора оказывают влияние силы потока воздуха от скорости полета летательного аппарата изменение усилий сжатия на каждой из рабочих ступеней компрессора. Центробежные силы, возникающие в роторе компрессора, создают значительные нагрузки на рабочие элементы лопаток.

Лопатки ротора турбины и сопловых направляющих аппаратов работают при весьма значительных силовых и температурных нагрузках. Поток газовой смеси, которая воспламеняется в камере сгорания, подается на рабочие лопатки турбины и создает высокие температурные и силовые нагрузки. Температура на входе в турбину равна $T_г$= 1300 К, а максимальная $T_{г\ max}$ =1550…1600 К [3]. Такие температуры требуют создания специальной системы охлаждения колес турбины и нанесения на перо лопатки высокотемпературного барьерного покрытия. Исходя из этого материал, применяемый для изготовления лопаток роторной и статорной части ГТД, имеет различные характеристики по химическому составу и механической прочности.

В табл. 3.2 представлен перечень основных материалов, применяемых для лопаток ГТД (по мере развития).

С целью уменьшения массы двигателя в роторе компрессора низкого и среднего давлений используются высокотехнологичные жаропрочные титановые сплавы с температурой в рабочей ступени колеса до 500°С.

Наиболее высокие требования предъявляют к материалу лопаток, работающих в зоне турбины ГТД. Вначале использовались хромоникелевые сплавы, которые подвергались деформированию методом горячей штамповки (ЭИ437Б, ЭП867, ЭП929 и др.), а после создания конструкции лопаток турбины с охлаждаемой полостью – хромоникелевые литейные сплавы ЖС-3, ЖС6-К, ВЖЛ-12у и др.

Таблица 3.2 – Материалы, используемые для изготовления лопаток

Лопатки	Номер ступени														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Компрессор														
Ротора	1Х12Н9Т (ЭИ-481) Х15Н5Д2Т ВТ – 9 ВТ-20						1Х17Н2 (ЭИ268Л) 38Х2МЮА (ЭП – 517)				ХН45МВТЮБР (ЭП -718ИД) Х15Н5Д2Т ЖС6У ВИ				
Статора	1Х12Н2ВМФ (ЭИ961-Ш) ВТ – 9						38Х2МЮА (ЭП -517)				ХН45МВТИБР (ЭП719 НД)				

Номер ступени				
	Турбина			
	1	2	3	4
Статора	ЖС6УВИ ЖС6ФВИ ХН ХН77ТЮР (ЭИ437Б) ХН62ВМКЮ (ЭП867) ХН60ВМТКЮ (ЭИ929) ЖС – 3 ЖС6 – К ЖС6К – ВИ ВЖЛ – 12У ЖС6У – ВИ ЖС6Ф– ВИ, ЖС-40 ЖС-30ВИ ЖС-30			
Ротора				

Таблица 3.3 – Химический состав и механические свойства сплавов, применяемых при изготовлении лопаток турбины ГТД

Содержание основных элементов, %	Сплав				
	ЖС6К-ВИ	ЖС6УВИ	ЖС6ФВИ	ЖС – 30	ВЖЛ-12Э
C	0,13 – 0,20	0,13 – 0,2	0,12 – 0,19	0,11 – 0,2	0,12 – 0,2
Cr	9,5 -12	8,0 – 9,5	4,0 – 7,0	5,0 – 9,0	8,5 – 10
Mo	3,5 – 4,8	1,2 – 2,4	0,8 – 1,5	0,4 – 1,0	2,7 – 3,4
W	4,5 – 5,5	9,5 – 11	11,0 – 13,0	11,0 – 12,6	1,0 – 1,8
Al	5,0 – 6,0	5,1 – 6,0	5,1 – 6,0	4,8 – 5,8	5,0 – 5,7
Ti	2,5 – 5,5	2,0 – 2,9	0,8 -1,5	1,4 – 2,8	4,2 – 4,7
Co	4,0 – 5,5	9,0 – 10,5	6,0 – 10,5	7,5 – 9,5	8,0 – 10,0
Fe	2,0	1,0	1,0	1,0	2,0
V			0,8 – 1,2		0,5 – 1,0
Механические свойства					
Временное сопротивление $\sigma_в$·,МПа	7,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Относительное удлинение δ %	5	3	3	3	3
Относительное сужение τ %	-	4	-	-	7

Примечание. Содержание Si и Mn по 0,4 % ; Ni – основной компонент

Для получения заготовок лопаток с направленной кристаллизацией или монокристаллической отливкой применяются сплавы ЖС-30, ЖС-30ВИ и др. Химический состав, механические свойства материалов, которые нашли наибольшее применение для производства лопаток турбины ГТД, представлены в табл. 3.3. Все они прошли длительные испытания на прочность при температуре 975° С, нагрузке 200 Н, времени выдержки 40 ч.

3.2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ТУРБИНЫ

3.2.1. Технологический анализ чертежа детали

Назначение, условия работы, материал. Лопатка ротора турбины воспринимает энергию от сжатого и нагретого газа и преобразует ее в механическую энергию вращения ротора. Она относится к числу наиболее нагруженных элементов ГТД.

Профильная часть лопатки – перо лопатки кроме растяжения от центробежных сил, изгиба и кручения от газового потока испытывает переменные напряжения от вибрационных нагрузок, амплитуда и частота которых меняются в широких пределах. Наиболее чувствительным параметром для лопатки является большой градиент температуры.

При работе двигателя на переходных режимах в кромках пера возникают напряжения, связанные с различием термического расширения тонких и утолщенных элементов пера. В замке лопатки помимо циклических растягивающих напряжений возникают значительные контактные напряжения, которые могут вызвать локальные разрушения в зоне контакта.

Для производства лопаток первой ступени турбины используется жаропрочный никелевый сплав, упрочняемый термовакуумной обработкой, ЖС-30ВИ (табл. 3.4). Он обладает термической стабильностью, но плохо поддается механической обработке (коэффициент обрабатываемости резанием – 0,04); имеет временное сопротивление $\sigma_в$=7,3 МПа, относительное удлинение δ=5% и относительное сужение τ= 6%.

Конструкция, геометрические характеристики лопатки и оценка ее технологичности. В конструкции лопатки можно выделить три элемента – замок (хвостовик) елочного типа, перо и бандажные полки.

Таблица 3.4. – Химический состав и механические свойства сплава ЖС-30ВИ

Химический элемент	Содержание, %	Химический элемент	Содержание, %	Химический элемент	Содержание, %
C	0,12 – 0,19	Fe	1,0	Ce	0,03
Si	0,4	Al	5,6 – 6,0	Ca	0,01
Mn	0,4	Ti	0,8 – 1,5	J	0,01
Gr	4,0 – 7,0	Co	6,0 – 10,5	Zr	0,01
Ni	Основа	Nb	1,2 – 1,7	S	0,01
Mo	0,8 – 1,5	V	0,8 – 1,2	P	0,015
W	11,0 – 13	B	0,15	Hf	1,0 – 1,5

Перо лопатки длиной 86,4 мм имеет сложную пространственную форму с переменным профилем в поперечных сечениях по длине. Сечения повернуты относительно друг друга, образуя закрутку пера. Внутри пера находится полость для подвода холодного воздуха из компрессора для охлаждения лопаток. Внутренняя полость лопатки имеет лабиринтную структуру. Стенки пера имеют малую толщину 1,5…2 мм.

Сопряжение между пером и хвостовиком, а также между пером и бандажными полками образовано радиусными поверхностями. Основные рабочие поверхности лопатки – корыто, спинка, входная и выходная кромки выполняются с высокой точностью. Допустимое смещение профиля относительно номинального положения (относительно основных конструкторских поверхностей) составляет 0,2 мм. Между заданными сечениями профиля пера необходимо обеспечить плавный переход. Контуры входной кромки по всей длине пера следует выполнять без огранки с плавным переходом. На пере лопатки необходимо создать термобарьерное трехслойное керамическое покрытие. По контуру замковой части лопатки методами пластического упрочнения обеспечиваются сжимающие напряжения. Шероховатость рабочих поверхностей пера лопатки составляет Ra= 2,5 мкм.

Исходя из этого, можно выделить следующие особенности лопаток первой ступени турбины:

1) высокие требования к качеству материала лопатки (используется сплав ЖС -3ВИ и др.);
2) трудная обработка материала методами резания (коэффициент обрабатываемости 0,04);
3) сложный пространственный профиль пера высокой точности;

4) сложная форма профиля замка и высокие требования к качеству поверхностей;
5) точность расположения профиля пера относительно замка лопатки 0 +0,2 мм;
6) наличие внутренней полости охлаждения лабиринтной структуры при малой толщине стенок лопаток;
7) сложная форма бандажных полок лопаток и высокая точность стыковочных элементов.

Перечисленные особенности лопаток первой ступени турбины определили следующие *основные пути получения исходной заготовки и процессы формирования качественных показателей детали в производстве*:

1) создание исходной заготовки методом монокристаллической отливки по выплавляемым моделям;
2) создание исходной заготовки без припуска по перу;
3) подготовка высокоточных технологических базовых поверхностей для установки и надежного закрепления заготовки в технологической системе;
4) использование электроэрозионной и электроимпульсной обработке для сложных поверхностей;
5) использование электрохимического шлифования и полирования различных поверхностей лопаток;
6) использование турбоабразивной обработки поверхностей;
7) использование ионно-имплантационной обработки металлов.

По словам генерального конструктора Н.Д. Кузнецова – создателя большой серии газотурбинных двигателей с высокими показателями качества – колесо турбины первой ступени является солнечным сплетением двигателя. Качественное изготовление лопаток турбины – залог надежности работы изделия.

3.2.2. Маршрутная технология изготовления лопаток турбины

Изготовление монокристаллической отливки и последующая механическая обработка поверхностей лопаток составляет единый, взаимосвязанный комплекс формирования показателей качества наиболее ответственной детали ГТД.

Технологический процесс изготовления лопаток можно условно разделить на два этапа:

1) отливка монокристаллической бесприпусковой (по перу лопатки) исходной заготовки по выплавляемым моделям;
2) механическая обработка лопаток турбины.

Первый этап. На рис. 3.3 представлен граф технологических процессов и операций получения исходной заготовки лопатки: последовательность подготовки основных элементов исходной заготовки, технологических процессов и средств для изготовления литейной формы, подготовки шихты, нагрева и заливки металла в формы, его охлаждения и выполнения других сопутствующих операций.

Второй этап комплексного технологического процесса изготовления заключается в последовательном повышении точности параметров на каждой ступени обработки и создании необходимых характеристик материала и поверхностей лопаток турбины. На рис. 3.4. представлен граф технологических процессов и операций механической обработки лопаток. Представленная последовательность изготовления исходной заготовки и ее механическая обработка обеспечивают главную задачу – выполнение показателей качества. Часть параметров выполняется в начале процесса и в малой степени зависит от выполнения последующих операций. Так, размеры и точность внутренней поверхности полости охлаждения лопаток обеспечиваются за счет точности стержня и качества выполнения операции отливки. Выполнение других операций комплекса практически не влияет на изменение характеристик данной поверхности.

Параметры, определяющие качество внутренней полости лопатки, условно можно назвать независимыми. Задача, которая ставится при разработке технологических процессов по дальнейшей обработке исходных заготовок, заключается в сохранении полученных значений качественных показателей параметров до конца комплексного технологического процесса. В то же время часть параметров качества лопаток в значительной степени зависит от выполнения требований на различных операциях всего комплексного технологического процесса. Так, достижение геометрической точности профиля пера лопатки обеспечивается на первом этапе технологического процесса, а точность профиля замка лопатки и его *расположение* относительно профиля пера – на втором этапе, при механической обработке шлифованием.

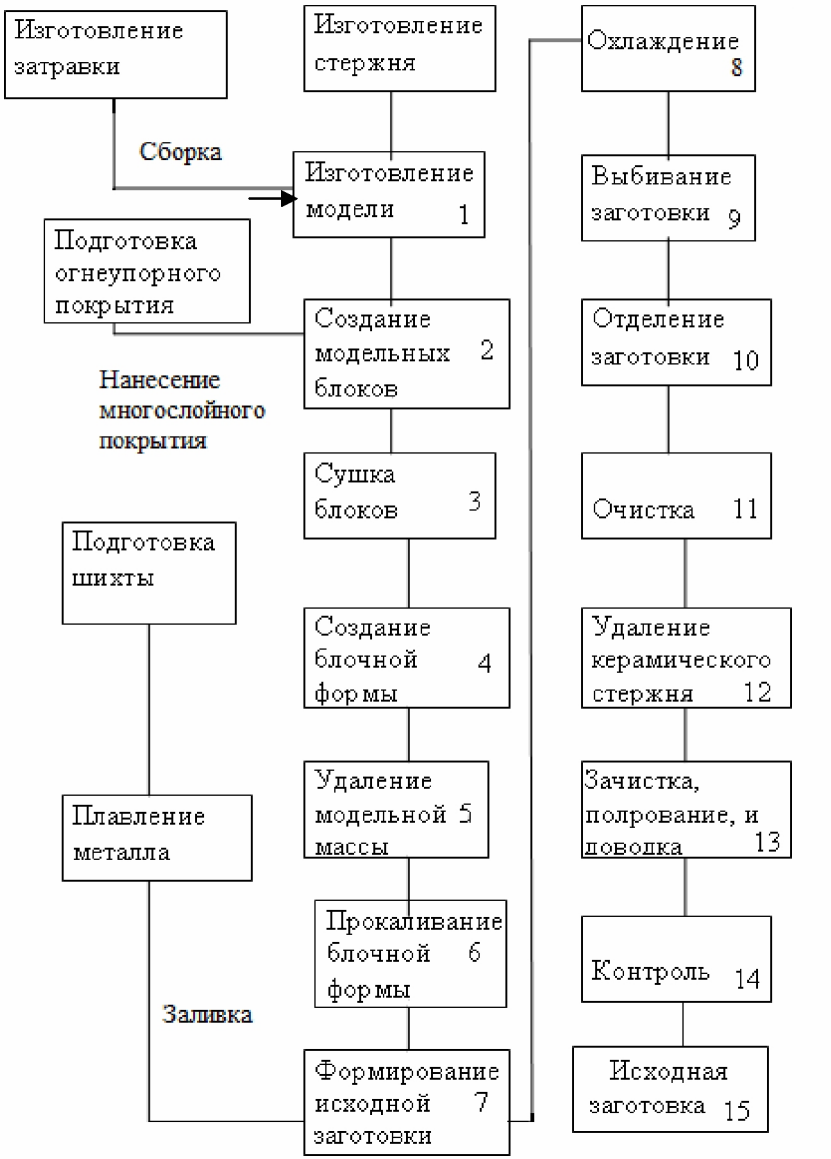


Рис. 3.3. Граф технологического процесса получения исходной заготовки лопаток первой ступени турбины

Рис. 3.4. Граф технологических процессов и операций механической обработки лопаток первой ступени турбины

Важным условием при такой схеме изготовления является сохранение точности пера лопатки, полученной при отливке исходной заготовки, и обеспечение *заданного расположения* (зависимого параметра качества) этого профиля относительно координатной системы $X_д Y_д Z_д$ замка.

Для беспripусковых заготовок лопаток параметры расположения профиля пера относительно замка могут быть выполнены двумя путями:

1) базированием заготовок при обработке профиля замка относительно профиля пера;
2) базирование заготовок при обработке профиля замка и профиля пера относительно специальных базовых технологических поверхностей.

В первом и во втором случае параметры точности расположения профиля пера относительно замка достигаются обеспечением качественного изготовления поверхностей заготовок на нескольких операциях технологического процесса. Суммарное смещение профилей пера и замка относительно друг друга при этом не должно превышать значений, заданных в чертеже и технических требованиях к чертежу.

3.2.3. Получение исходной монокристаллической заготовки

Составляющие технологического процесса изготовления. Получение монокристаллической отливки осуществляется на базе нескольких подготовительных процессов, которые обеспечивают формирование геометрической формы и качества отдельных элементов заготовки.

На рис. 3.5 представлена исходная монокристаллическая заготовка. Внутренняя лабиринтная полость – контур *8* и входные отверстия *1,2* формируются за счет копирования контура керамического стержня в процессе литья. Стержень устанавливается перед заливкой металла в литейную форму.

Внутренний контур на рис. 3.5 показан (для наглядности) после удаления стенки лопатки со стороны спинки.

В верхней части заготовки лопатки имеется отверстие *10*, которое служит для ориентирования конца стержня в литейной форме. В этом месте в литейную форму устанавливается специальная затравка, которая обеспечивает начало кристаллизации в процессе остывания расплавленного металла. Профиль пера лопатки (спинка *9* и корыто *13*),

входная, выходная кромки и радиусы переходов пера в бандажные полки обеспечиваются копированием контура литейной формы при заливке расплавленного металла. В исходной заготовке в процессе отливки создаются технологические установочные базовые поверхности, которые создают координатную систему исходной заготовки $X_з Y_з Z_з$. Они соответственно определяют ориентирование исходной заготовки в направлениях координатных осей. Поверхность *14*, которая размещается в подполочном пространстве лопатки со стороны спинки, ориентирует заготовку в направлении оси $Z_з$. Поверхность 6 определяет положение заготовки в направлении оси $X_з$, а поверхности *3* и *4* – в направлении оси $Y_з$.

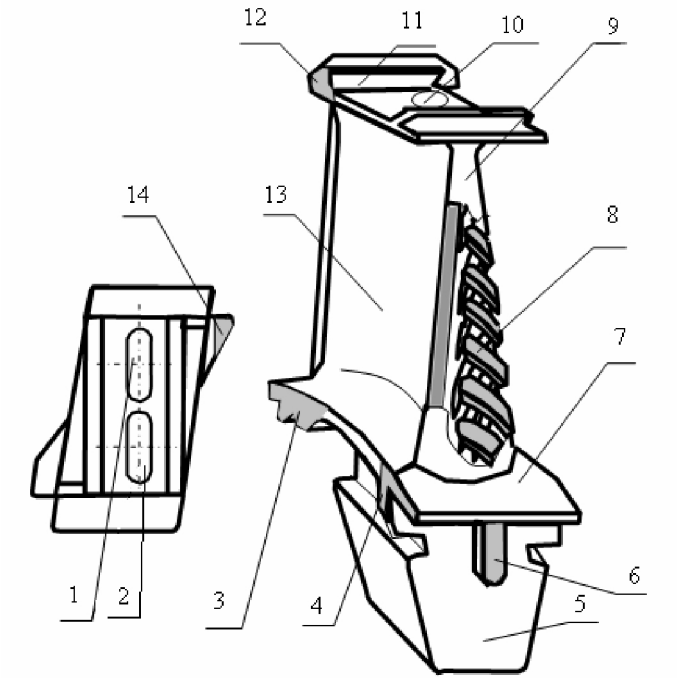


Рис. 3.5. Исходная монокристаллическая заготовка лопатки первой ступени турбины:

1,2 – выходные отверстия; *3,4,6,12,14* – технологические базовые установочные поверхности; *5* – замковая часть заготовки лопатки; *7* – нижняя замковая бандажная полка; *8* – внутренний лабиринтный контур; *9* – спинка лопатки; *10* – место установки монокристаллической затравки; *11* – верхняя бандажная полка; *13* – корыто лопатки

Для обеспечения высокой точности контроля параметров лопатки и установки заготовки в технологической системе предусматривается также дополнительная установочная поверхность *10*, которая расположена на верхней бандажной полке и создает значительное увеличение протяженности установочных элементов *8, 9* и *10*, обеспечивая точное ориентирование заготовки в технологической системе в направлении оси $Y_з$. Замковая часть лопатки *11* при литье выполняется в виде трапеции и имеет припуск металла по контуру 1,5…2 мм.

Бандажные полки 11 и 7 имеют контур, приближенный к контуру готовой детали. Припуск на обработку по торцам составляет 2 мм. В отдельных местах верхней бандажной полки *11* и нижней полки *7* за счет напусков толщина слоя металла на обработку увеличивается. В связи с этим и в соответствии с правилами формирования технологических процессов и особенностями изготовления деталей ГТД количество ступеней обработки данных поверхностей возрастает.

Процесс создания монокристаллической лопатоки по выплавляемой модели имеет следующую последовательность. Вначале изготавливают керамический стержень, устанавливают его в пресс-форму модели лопатки и создают модель из легкоплавкого модельного материала (парафина, церезина, мочевины). К этой модели приклеивают затравку. Затем четыре модели объединяют с литниковой системой в модельный блок, который обсыпают электрокорундом вместе с огнеупорной суспензией. Многократное покрытие модельного блока создает огнеупорную многослойную керамическую стенку (корку). Для обеспечения минимальной шероховатости рабочих поверхностей исходных заготовок зернистость электрокорунда первого слоя керамической стенки принимается равной 2…5 мкм.

Легкоплавкий материал, из которого сделаны модели лопаток и литниковая система, удаляют водой, нагретой до 100°С. После этого полученную форму сушат, прокаливают и устанавливают в опоку, засыпая пустое пространство между формой и опокой шамотной крошкой, графитом, а места засыпки и отверстия в керамической оболочке заделывают жидкостекольной смесью (кварцевый песок – 75%; маршалит – 21%; жидкое стекло – 4%).

В подготовленную литейную чашу укладывают шихту металла определенной массы. Отверстие в полость литейной формы закрывают специальной керамической заглушкой. Подготовленная система устанавливается в специальную плавильную печь (ПМП–2). При изготовлении выплавляемых моделей лопаток применяют пресс-формы, которые должны отвечать следующим основным требованиям:

обеспечивать получение моделей с заданной точностью;

иметь минимальное число разъемов;

иметь устройства для удаления воздуха из рабочих полостей;

быть технологичными в изготовлении, долговечными и удобными в работе.

Пресс-формы для моделей лопаток и керамических стержней изготавливают из стальных сплавов 38Х, а пресс-формы для литниковой системы – из алюминиевых сплавов.

Для формирования внутренней полости лопаток используют керамические холодноотвержденные (второй класс) или спеченные (первый класс) стержни.

Холодноотвержденные стержни изготавливают на основе свойства кислого (pH = 2) связующего раствора этилсиликата (этс) переходить в желатинообразное, а затем в твердое состояние (гель) при введении в смесь щелочной жидкости с pH > 8. Гель SiO_2 цементирует зерна основы и обеспечивает необходимую твердость. В производстве такой способ изготовления называется шоу-процесс.

Процесс изготовления керамических стержней (рис. 3.6) начинается с гидролизованного этилсиликата.

Основные компоненты гидролизованного этилсиликата:

этилсиликат 40 (3 л);

спирт этиловый (2 л);

дистиллированная вода (0,24 л);

соляная кислота (0,022 л).

Эти компоненты загружаются в гидролизер (типа СПБ-К305-708; СПП-К305-708а) поочередно. Время загрузки компонент 35…45 мин, температура при гидролизе 35…40°С. В процессе гидролиза происходит смешивание компонентов. Частота вращения смесителя составляет 60…70 $мин^{-1}$. Затем гидролизованный этилсиликат разливают в стеклянные емкости. Температура хранения гидролизата не выше 25°С, срок годности – до 10 сут., вязкость 4,5…6,0 $мм^2/с$ (сС). Одновременно с выполнением данной операции производится приготовление шихты для керамических стержней, основными компонентами которой является:

электрокорунд (N10 – 25%; N5 – 35%; М20, М14 – 27%);

диоксид титана (1%);

алюминиевый порошок АДС (4…5%);

сухой колдидальный графитовый препарат (2%);

пластификатор ПП10 (5%).

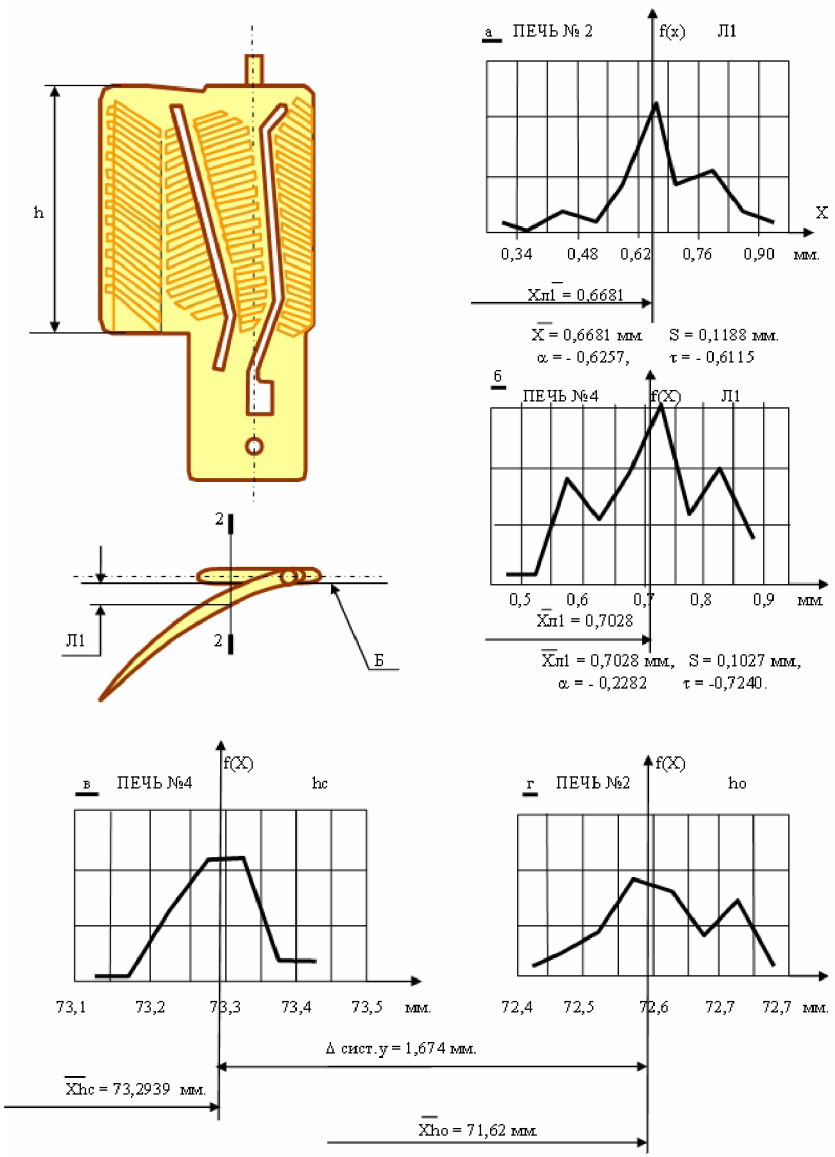


Рис. 3.6. Керамический стержень и некоторые статистические данные, использованные при доводке производства и комплексном анализе монокристаллических исходных заготовок:

——— – печь № 2; – – – печь № 4

Компоненты перемешиваются в течении 30 мин. Масса шихты составляет 10 кг. При перемешивании используется смеситель типа СВ-10-186. Готовая шихта загружается в металлические ящики.

Следующая операция по созданию керамических стержней заключается во взвешивании исходных материалов в такой пропорции:

100% – шихты керамической;

21% гидролизованного этилсиликата;

1% (от веса шихты) 15-процентного раствора едкого натра или калия.

Формирование профиля керамического стержня осуществляется после смешивания этих компонент и заливке этой смеси в бак шприц-машины. Прессование стержня происходит в автоматическом режиме при давлении 0,4 …0,6 МПа. Перед операцией подготавливаются пресс-формы машины, рабочие поверхности формы покрывают смазкой (солидолом). Смазка и спирт в процессе прессования и нагрева выгорают. После затвердевания керамической массы стержень легко вынимается и разъемной полуформы. Полученный керамический стержень подвергают пропитке смесью этилцеллозольва (30%) и гидролизата (70%) и последующей сушке. Сушка проводится в специальном сушильном устройстве. При температуре 80…120°С, в течение 20 мин.

Под сухим твердофазным спеканием изготовления стержней понимают получение камнеподобных предметов после обжига, сформированных с плассификатором смесей из полидисперсных порошков. Сухое спекание – это процесс, идущий в направлении уменьшения свободной энергии системы и протекающий при температуре не менее $0{,}8T_{пл}$ (температура плавления) чистого огнеупорного окисла, при этом зерна порошков «свариваются» (спекаются друг с другом), стержень приобретает прочность.

Микроструктура лопаток формируется в зависимости от технологического процесса отливки. Ее можно разделить на три типа:

полукристаллическая (равновесная);

направленная (продольно-ориентированная);

монокристаллическая.

Лопатки с равновесной структурой отливаются в вакуумных индукционных печах периодического или полунаправленного действия (УППФ-3). До середины 70-х годов XX века свойства литейных сплавов улучшались благодаря примененииию дополнительных легирующих элементов, но постепенно был достигнут уровень, при котором дальнейшее легирование практически не изменяло характеристик никелевых сплавов.

Дальнейшее улучшение свойств сплавов явилось результатом нового подхода к технологии производства лопаток – **получение направленных структур**, при котором металл подвергается процессу кристаллизации таким образом, что направление в материале с оптимальным сочетанием механических свойств устанавливается параллельно оси основного напряжения в лопатке.

Повышение прочности как результат ориентации микроструктуры достигается исключением наиболее слабых мест структуры (поперечных границ кристаллов) или благодаря наличию ориентации высокопрочной фазы в микроструктуре, как в эвтектических сплавах или в сплавах, упрочненных тугоплавкими волокнами.

Для создания условий при изготовлении монокристаллической отливки производится подготовка специальной монокристаллической тугоплавкой затравки.

Создание затравки заключается:

в подготовке тугоплавкой шихты металла Ni+W и индукторной печи;

приготовлении керамических коробов, подножий;

изготовлении моделей матричных затравок;

сборке секций модельных затравок;

подготовке форм к заливке и проведении операции по отливке затравок.

Специальная система охлаждения с использованием молибденовых стоек, молибденовых и медных холодильников позволяет создать монокристаллические тугоплавкие затравки с направленным кристаллом в процессе охлаждения.

На последних этапах изготовления затравок производится кристаллографическая ориентация секций затравок и контроль их микроструктуры.

Процесс изготовления моделей исходных заготовок лопаток включает следующие операции:

приготовления модельных составов;

получение модельных отливок лопаток и литниково-питающей систем;

отделку и контроль последних.

Заливка модельной массы в пресс-форму модели лопатки происходит после установки в нее керамического стержня. Базовыми элементами стержня являются поверхности цилиндрической и плоской формы, которые расположены у его основания. Для уменьшения перекоса стрежня при сборке с пресс-формой его поджимают упором. Модель-

ную массу при температуре не более 140°С заливают в форму. Процесс заливки должен быть медленным, плавным, без разрыва «единой ленты». После остывания пресс-форму разбирают. Вначале удаляют часть формы с вкладышем, которая формирует профиль верхней бандажной полки. После полной разборки пресс-формы и ремонта модели в случае необходимости она поступает на следующий этап – сборку модельного блока.

На участке сборки моделей и блоков необходимо поддерживать строгий температурный режим (23…28°С). Влажность при этом должна соответствовать 40…60%, так как материал модели гигроскопичен.

К свойствам модельных составов предъявляют комплекс требований, которые могут иметь существенное различие в зависимости от конфигурации размеров и назначения отливок, необходимой размерной точности и качества поверхности. Необходимо, чтобы модельные составы обеспечивали получение высококачественных моделей при одновременной технологичности составов (простоте их приготовления, удобстве использования, возможности утилизации).

В отечественной практике литья по выплавляемым моделям наиболее часто используют парафин, церезин, буроугольный воск, торфяной воск, канифоль, карбамид, стеарин, полиэтилен и другие добавки, на основе которых приготавливают модельные составы.

Предварительное приготовление большинства модельных составов состоит в поочередном и одновременном плавлении составляющих, фильтрации расплавов и разливке их непосредственно по калеманам (нагревательное устройство для поддержания температуры модельного состава) на рабочие места или в формы-изложницы. При подготовке выплавляемых модельных составов можно использовать до 90% возврата, собранного при удалении моделей из оболочек форм.

Для изготовления моделей лопаток в качестве модельного состава применяется карбамид с добавками калиевой селитры (МОН-10К). Модели, изготовленные из составов на основе карбомида, гигроскопичны, поэтому их покрывают раствором лака АК-593.

Сборка моделей лопаток в блоки, как правило, производится двумя способами:

припаиванием моделей лопаток к модели литниковой системы с помощью подогретого ножа, шпателя или специального электропаяльника;

соединением моделей в кондукторе с одновременной отливкой моделей литниковой системы.

Основа способа литья по выплавляемым моделям – оболочковая форма: неразъемная, горячая, негазотворная, газопроницаемая, жесткая с гладкой контактной поверхностью, точная. Для изготовления отливки лопаток применяется многослойная оболочка, получаемая нанесением суспензии на модельный блок с последующей обсыпкой и сушкой. Суспензия для оболочковых форм – это взвесь твердых частиц микропорошков огнеупорной основы (белый электрокорунд, дистенсилиманит) в жидкости (связующем) различного размера. В качестве связующего в суспензии применяется гидролизованный этилсиликат-40. В зависимости от габаритов модельного блока и технологии заливки формы применяют семь-десять слоев огнеупорного покрытия. Первый облицовочный слой обсыпают мелкозернистым материалом, чтобы получить гладкую поверхность.

После формирования оболочковой формы производится удаление модельного состава (массы). Как правило, восковые составы выплавляются, солевые растворяются в воде, пенополистироловые выжигаются.

В дальнейшем оболочковые формы подвергаются прокаливанию. При этом решаются три задачи: удаляются газотворные составляющие; повышается прочность оболочки; осуществляется нагрев для лучшего заполнения полостей металлическим расплавом. Прокаливают оболочки в окислительной среде нагревом в газовых или электрических печах до 900…1000°С.

При изготовлении лопаток турбины применяют вакуумные плавильные установки, в которых производится подогрев керамической оболочки до технологических температур, плавка металла, заливка оболочек и кристаллизации металла. Плавка металла в вакуумных установках производится в индукционных печах и печах сопротивления, в которых тепловая энергия передается оболочке и металлу излучением от нагревателей. Отливку лопаток производят в проходных методических вакуумных печах непрерывного действия ПМП–2, ПМП–4 (табл. 3.5).

В таких печах керамическая оболочка с навеской металла в чаше (бестигельная) устанавливается в графитовую опоку, а опоки одна за другой проходят через зоны нагревания, охлаждения и кристаллизации I–VII (рис. 3.7). После установки пяти опок в первый отсек печи форвакуумный насос создает вакуум 6,6…0,3 кПа (5,10…2 мм рт. ст.). Затем с помощью механизма привода стола предварительно открывается вакуумный затвор и опоки поступают на участок подготовки шихты металла, на котором металл предварительно нагревается.

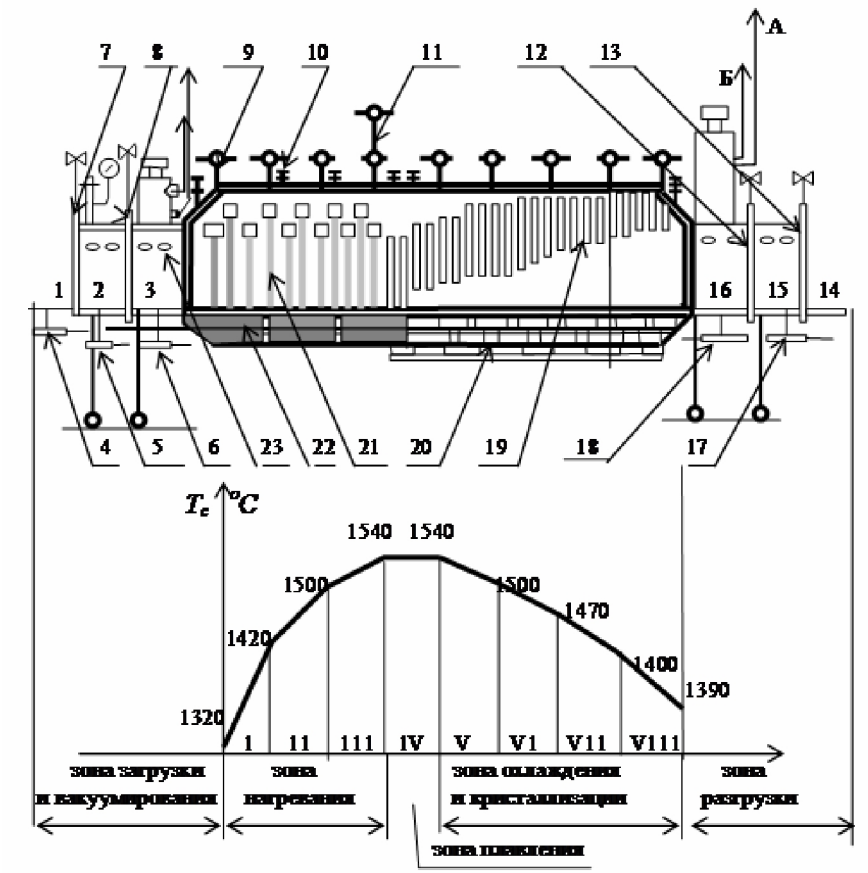


Рис. 3.7. Схема вакуумной печи ПМП-2:

1 – стол загрузки опок; *2, 3* – столы форкамеры с механизмом проталкивания опок; *4-6* – гидроцилиндры механизмов подвода столов и транспортировки опок; *7, 8, 12, 13* – воздушные затворы; *9* – вакуумные шиберы; *10* – взрывные клапана; *11* – термопара ВР5/ВР20; *14-16* – приемные столы для разгрузки; *17, 18* – гидроцилиндры механизмов движения столов при разгрузке опок; *19* – нагреватели в зоне кристаллизации и охлаждения исходных заготовок; *20* – охладительная система печи; *21* – нагреватели печи; *22* – термоизоляция печи; *23* – смотровые окна; *А* – к формовакуумному насосу ВН-4Т; *Б* – к бустерному насосу

Затем опоки по одной с циклом в 10 мин. поступают на участок плавки металла, где происходит постепенное его плавление по зонам. Колебание температуры T_o в каждой из зон лежит в пределах +20…10°С.

Таблица 3.5. Характеристика вакуумных печей

Параметры	ПМП-2	ПМП – 4	ПМП-4М
Мощность, кВт	1200	1200	1500
Температура нагрева, °С	1560	1600	1600
Производительность, шт./ ч.	8 – 10	16 – 20	16 – 20
Ширина блока, мм	300	300	500
Межремонтный срок эксплуатации, дни	20	120	120

После полного расплавления шихты металла в литниковой чаше осуществляется заливка расплава. При этом керамическая пробка, которая закрывает отверстие в литейную форму, открывается специальным упором.

В зоне кристаллизации залитые формы в графитовых опоках проходят по водохлаждаемому кристаллизатору, происходит направленное охлаждение формы с заданной скоростью (выход из зоны нагрева путем продвижения вдоль постепенно поднимающихся боковых нагревателей и теплопередачей от формы к катализатору и стенкам печи).

На основе технологического процесса отливки лопаток с направленной кристаллизацией в серийном производстве разработана технология литья лопаток с монокристаллической структурой. Формирование монокристаллической структуры производится затравочным способом, позволяющим получить отливки любой заданной ориентацией. В процессе заполнения оболочки в зонах плавления металлом происходит подрастворение торца тугоплавкой затравки жидким сплавом, а при захождении оболочки в зону кристаллизации – передача структуры затравки кристаллизуемой отливке.

Монокристаллические лопатки турбин обычно имеют кристаллографическую ориентацию 001 относительно их вертикальной оси. Применение технологии монокристаллического литья для жаропрочных сплавов с традиционным легированием, содержащих элементы, упрочняющие границы зерен, не позволяет в полной мере реализовать потенциальные возможности монокристаллов. Безуглеродистые сплавы

для монокристаллического литья по сравнению со сплавами с направленной структурой имеют значительное преимущество по характеристикам выносливости. Это объясняется отсутствием карбидной фазы, которая является очагом зарождения микротрещин при циклических и термоциклических нагрузках.

После охлаждения залитых оболочковых форм на воздухе до температур окружающей среды производится выбивка блоков отливок из керамической оболочки. Бой керамической оболочки после выбивки подвергается разлому и последующей регенерации. Полученный порошок белого электрокорунда (шлиф) вновь возвращается на операцию нанесения огнеупорного покрытия на модельные блоки.

Отделение литниковой системы от залитых лопаток производится на специализированных станках при помощи абразивно-отрезных кругов на вулканитовой основе или армированными отрезными кругами.

Из заготовки с керамическим стержнями внутри удаляют керамический стержень механическим способом при помощи клепального пневмомолотка или химическим способом в расплаве соли бифторида калия.

Исходную заготовку лопатки с направленной кристаллизацией или монокристаллической структурой подвергают травлению с целью проверки качества поверхности в растворе хлорного железа, затем очистке сухим способом в песчано-воздушной струе в специальных очистных камерах. В качестве абразивного материала применяется белый электрокорунд. В дальнейшем заготовка подвергается механической зачистке заусенцев, облоев и других неровностей на поверхности, проверке профиля пера и подгонке, если необходимо, базовых поверхностей для обеспечения дальнейшей механической обработке заготовок.

Все исходные заготовки подвергают рентгеновскому контролю на наличие внутренних дефектов и люминесцентному контролю для выявления поверхностных микродефектов типа плен, микротрещин, рыхлот.

При переходе заготовки на второй этап обработки в механическом производстве исходная монокристаллическая беспripусковая заготовка (рис. 3.5) должна иметь коэффициент использования материала (КИМ) не менее 0,8.

Отливка и контроль материала выполняется в соответствии с ТУ01.1073.

Допуски на литейные размеры в пределах (ЛТ-2). Отливка на механическую обработку поступает без припуска по профилю пера, входной кромке, по трактовым поверхностям, по наружной поверхности бан-

дажной полки, по поверхностям кармана и ножки хвостовика со стороны спинки и корыта.

Базы для контроля и механической обработки (поверхности 6-10) должны быть плоскими, без наплывов и повреждений. Отклонение наружных профилей пера от номинальных размеров при плавном переходе допускается не более 0,2 мм.

При устранении литейных дефектов допускается местное отклонение профиля до 0,1 мм в сторону утонения, но с выполнением заданной толщины стенки по профилю пера лопатки.

Между заданными сечениями профилей пера обеспечивается плавный переход. Контур входной кромки пера выполняется без огранки, с плавным переходом к контурам корыта и спинки. Смещение трактовых поверхностей верхней бандажной полки и нижней замковой полки не более 0,15 мм. Радиус перехода пера к полке (3±0,5) мм.

Шероховатость поверхностей спинки пера Ra = 1,25 мкм, корыта и трактовых полок не хуже Ra = 2,5 мкм, а других необрабатываемых поверхностей не хуже Rz = 20 мкм. Отклонение контуров внутренней полости от номинальных размеров не более 0,3 мм. Смещение внутренней полости от номинального положения не более 0,4 мм. Засорение внутренне полости не допускается.

3.2.4. Анализ качественных показателей исходной заготовки лопатки

В процессе создания монокристаллической исходной заготовки используется большое количество операций, качество исполнения которых непосредственно влияет на выходные характеристики лопаток. На рис. 3.8 представлена комплексная схема размерных связей пера лопатки исходной заготовки, полученной методом монокристаллической отливки (данные только для одного сечения лопатки). В сечении 2-2, которое расположено относительно координатной системы $X_{из}Y_{из}$ измерения заготовки на расстоянии 6 мм показаны геометрические параметры четырех точек, которые заданы размерами K_2 = (–3,85±0,2) мм, C_2 = (–11,49±0,2) мм. Эти размеры определяют положение точек профиля пера в заданном сечении со стороны спинки и корыта (см. табл. 3.1). Размеры K_3=K_4=1,1±0,25 мм определяют толщину стенки лопатки

В связи с тем, что производство исходной заготовки предусматривает получение ее без припуска по перу, размеры, определяющие толщину стенок лопатки, должны соответствовать значениям, заданным в

чертеже готовой детали, т.е. размеры $К_3$ и $К_4$ выполняются окончательно. Размеры $К_2$ и $С_2$ окончательно будут сформированы после изготовления лопатки в механическом цехе после шлифования профиля елочного замка. Этой операцией необходимо обеспечить профиль замковой части и положение его относительно профиля пера.

В принятой схеме обработки основных элементов лопатки условие формирования профилей пера и замка осуществляется относительно общих технологических установочных базовых поверхностей.

В приведенном ниже анализе проводится оценка точности исполнения параметров исходной заготовки, полученной в процессе выполнения монокристаллической отливки на первом этапе комплексного технологического процесса без учета дальнейшей механической обработки.

Размеры внутренней полости охлаждения лопатки определяются качеством исполнения нескольких операций:

изготовлением керамического стержня в пресс-форме;

сушкой в печи и последующей правкой (в случае необходимости) и др.

На этих операциях создаются необходимые размеры керамического стержня с учетом возможной усадки и коробления в процессе сушки. При установке стержня в полость пресс-формы модели возникают погрешности, которые влияют на положение образующих поверхностей стержня и, как следствие, на размеры толщины стенок лопатки.

Операции по созданию модели лопатки, формированию внутренней полости литейной формы в процессе нанесения огнеупорного многослойного покрытия, последующая сушка и прокаливание этой формы создают необходимую точность профиля пера лопатки и положение его относительно технологических баз. При заливке металла в форму и его остывании происходит изменение геометрических параметров исходной заготовки. Систематические составляющие этих погрешностей учитываются при доводке моделей, форм, режимов выполнения операций и других элементов и параметров технологического процесса. Аналитическое определение этих погрешностей затруднительно.

В связи с этим при проектировании оснастки, выборе режимов выполнения операций, при назначении методов и средств исполнения элементов исходной заготовки применяются аналитические и статистические зависимости, полученные в процессе теоретико-экспериментальных исследований изготовления исходной заготовки.

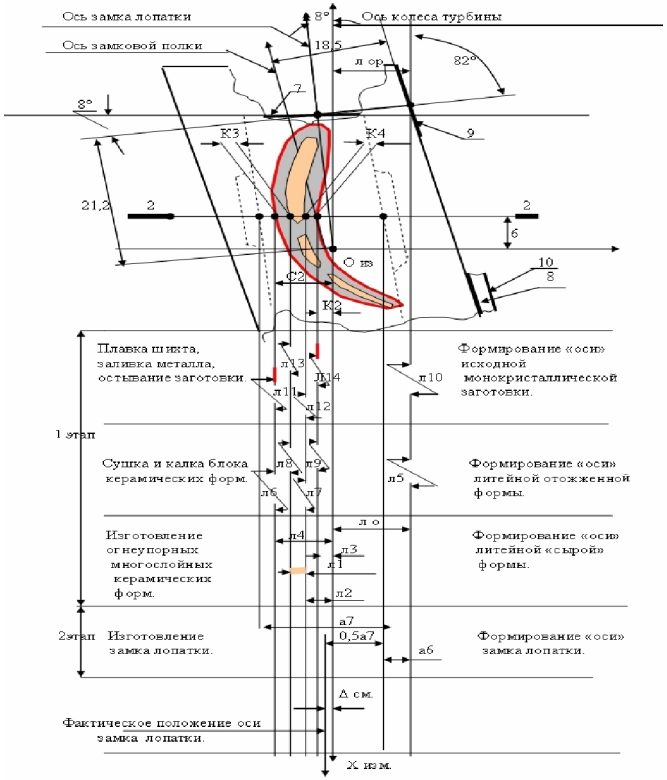


Рис. 3.8. Комплексная схема размерных связей исходной монокристаллической заготовки лопатки:
$Л_{ор}$ – расчетная величина переноса координатной системы к базовой оси установочных поверхностей исходной заготовки; $Л_{о}$– расчетная величина смещения «оси» литейной формы относительно установочных поверхностей исходной заготовки; $Л_{ор}$ и $Л_{о}$ – постоянные величины, определяют перенос измерительной и расчетной координатной системы в удобное для контроля и расчетов положение; $Л_1$ – толщина керамического стержня в сечении 2-2; $Л_2$ – положение вогнутой части профиля керамического стержня относительно базовой установочной поверхности Б (см. рис. 3.6); $Л_3$ – положение образующей профиля корыта модели в заданной точке до заливки легкоплавкой смеси; $Л_4$ – положение образующей профиля спинки модели в заданной точке до заливки легкоплавкой смеси; $Л_5$ – изменение положения «оси заготовки», образованной комплексом базовых поверхностей 7-10 после сушки и калки керамического блока форм; $Л_6$, $Л_7$ – изменение положения образующей профиля спинки и корыта в заданных точках за счет усадки модели и сушки керамического блока форм; $Л_8$, $Л_9$ – изменение положения образующих керамического стержня при сушке и калке форм; $Л_{10}$ – изменение положения «оси заготовки» после заливки расплавленного металла в форму и остывания этого металла в процессе кристаллизации; $Л_{11}$–$Л_{14}$ – изменение положения образующей профиля исходной заготовки относительно образующей формы за счет усадки металла исходной заготовки в процессе заливки и остывания металла

Статистические исследования позволяют:

в процессе освоения производства определить значения систематических составляющих производственных погрешностей и поля рассеивания случайных составляющих, которые используют для корректировки параметров оснастки и режимов обработки;

наметить конструкторско-технологические мероприятия по стабилизации составляющих параметров производства и обеспечить рекомендуемые значения коэффициентов точности $К_т$.

На рис. 3.6 приведены некоторые статистические данные, полученные по методике [17– 19], использованные при доводке производства и комплексном анализе монокристаллических исходных заготовок.

Усадка керамического стержня в анализируемом сечении 2-2, рассмотрена при сушке стержней в печах №2 и 4.

При статистическом анализе данных принимались размеры стержней $Л_1$, полученные при обработке в этих печах.

Анализ проведен для партии стержней в количестве 65 штук для каждой печи. Полученные результаты позволяют определить поле рассеивания производственных погрешностей и характер распределения случайных $\omega = 0{,}7$ мм и $\omega = 0{,}6$ мм, соответственно для печи №2 и №4, систематических составляющих по одному элементу технологического процесса – изготовления керамических стержней. Сравнивая эти значения с данными значениями для «сырых стержней», производится корректировка исполнительной оснастки и режимов обработки.

На рис. 3.6 а,б приведены значения неотожженных длин (сырых) и отожженных керамических стержней в печах. Величина усадки (средняя статистическая) отожженного стержня по длине h в сравнении с неотожженным стержнем

$$\Delta_{сист.у.} = \bar{X}_{h0} - \bar{X}_{hc} = 1{,}674 \text{ мм}.$$

Поле рассеивания ω_h случайных составляющих рассматриваемых параметров имеет соответственно значения 0,4 и 0,5 мм для разных печей.

Аналогичные результаты позволяют производить конструкторско-технологические мероприятия по улучшению характеристик качества составляющих элементов производства, выделяя при этом наиболее значимые составляющие, которые вносят значительные изменения в анализируемый суммарный параметр качества.

На основании известных значений составляющих параметров из чертежей оснастки, технологических процессов изготовления отдельных элементов исходной заготовки лопатки, а также на основании ста-

тистических данных исследований проведем анализ исполнения заданной точности основных размеров исходной заготовки.

Анализ точности основных геометрических параметров исходной заготовки. По мере изготовления элементов заготовки и использования технологической оснастки в соответствии с маршрутной технологией исходной заготовки (рис. 3.3) методом последовательного наращивания параметров, характеризующих изменения, происходящие при изготовлении, т.е. от частного к общему, составлена комплексная схема, показанная на рис. 3.8. На основании этой схемы и известных значений составляющих параметров проведем анализ выполнения заданных чертежных значений размеров K_2, C_2, K_3 и K_4.

Необходимо отметить, что из всего множества точек, которые определяют точность пера лопатки и точность его расположения относительно координатной системы $X_{из}Y_{из}$, приняты четыре точки, которые характеризуют точность изготовления всего комплекса геометрических параметров профиля пера лопатки. Методика анализа точности основана на теории размерных связей в изделиях и технологических процессах [10,15,19 – 21].

При создании монокристаллической исходной заготовки можно выделить три комплекса работ.

В *первом комплексе* (рис. 3.8) выполняются следующие операции:
подготовка модельной формы;
установка в модельную форму керамического стержня;
заполнение модельной формы легкоплавкой смесью;
остывание, сушка и доводка модельной формы;
сборка модельного блока;
нанесение многослойного керамического покрытия.

Во *втором комплексе* работ выполняются следующие операции:
удаление из модельных форм легкоплавкой смеси;
сушка модельного блока;
контроль модельного блока;
калка модельного блока.

В *третьем комплексе* осуществляются следующие операции:
установка модельных блоков в опоки и засыпка их графитовой смесью;
установка шихты в литниковую чашу;
загрузка опок в тоннельную печь;
вакуумирование, нагрев, охлаждение и кристаллизация заготовки;
выбивание исходной заготовки из керамической формы;
доработка исходной заготовки.

При выполнении основных операций происходит формирование качественных показателей исходной заготовки. В комплексной схеме представлены размерные связи перечисленных операций (рис. 3.8). Эта схема построена на основании технологического процесса изготовления исходной заготовки (рис. 3.3) и операции №65 (рис. 3.10).

Геометрические параметры и допуски на составляющие элементы операций, точность применяемой оснастки, статистические данные, полученные при анализе отдельных элементов процесса, позволяют провести оценку выполнения заданных значений параметров пера лопатки ($К_2$, $С_2$, $К_3$, $К_4$) на первом этапе изготовления.

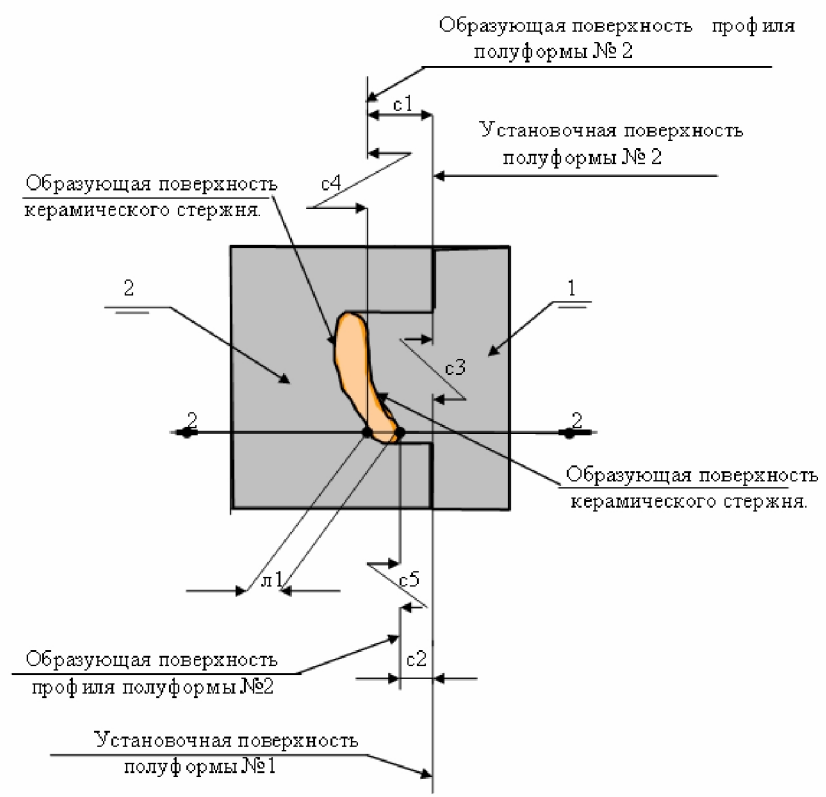


Рис. 3.9. Комплексная схема размерных связей при формировании керамического стержня:
1 – полуформа 1; *2* – полуформа 2; *3* – керамический стержень

В связи с тем, что в данной комплексной схеме приведены упрощенные линейные размерные связи, при анализе качественных показателей исходной заготовки в соответствии с основным правилом линейных размерных цепей будем использовать при расчетах величины возможных погрешностей и полей рассеивания составляющих параметров в направлении замыкающего звена.

При *анализе толщины $Л_1$ керамического стержня* при его формировании в двух полуформах в процессе прессования и сушки имеют место следующие составляющие параметры:

C_1 и C_2, определяющие расположение рабочих профилей пресс-форм относительно установочных поверхностей соединения этих полуформ;

C_3, определяющий плотность соединения полуформ в процессе их сборки;

C_4 и C_5 – изменения положения образующей поверхности стержня в процессе остывания керамической массы в пресс-форме.

Сумма полей рассеивания данных составляющих параметров определяет ожидаемые значения толщины керамических стержней в изготовляемой партии.

Принимая, поля рассеивания ω_i в соответствии с технологическими значениями, полученными из чертежей оснастки, операционных карт и статистических данных анализа, имеем:

$$\omega_{C1} = 0{,}06 \text{ мм}; \ \omega_{C2} = 0{,}06 \text{ мм}; \ \omega_{C3} = 0{,}02 \text{ мм};$$
$$\omega_{C4} = 0{,}2 \text{ мм}; \ \omega_{C5} = 0{,}2 \text{ мм}.$$

В этом случае суммарная величина поля рассеивания ($\omega_\Sigma = \Sigma\omega_{ai}$).

Поле рассеивания толщины стержня:

$$\omega_{\tilde{E}_1} = \omega_{\tilde{N}_1} + \omega_{\tilde{N}_2} + \omega_{\tilde{N}_3} + \omega_{\tilde{N}_4} + \omega_{\tilde{N}_5} = 0{,}54 \ \grave{i}\grave{i} \ .$$

Эта величина больше заданного допустимого значения 0,1 мм.

Из суммы составляющих параметров видно, что значительным источником погрешностей в принятой схеме формирования качественных показателей керамических стержней является процесс усадки и сушки их в полуформах.

Анализ размерных связей основных параметров (K_2, C_2, K_3, K_4) исходной заготовки (рис. 3.8.) проведен в соответствии с комплексной

схемой и известными значениями полей рассеяния составляющих параметров.

Поле рассеивания ω_{K_2} размера K_2, равно сумме полей рассеивания составляющих звеньев, т.е.

$$\omega_{\hat{E}_2} = \sum \omega_i = \omega_{\ddot{E}_{i\partial}} + \omega_{\ddot{E}_{10}} + \omega_{\ddot{E}_5} + \omega_{\ddot{E}_0} + \omega_{\ddot{E}_3} + \omega_{\ddot{E}_7} + \omega_{\ddot{E}_{12}} \le \grave{O}_{\hat{E}_2} \le 0{,}4 \text{ ìì}.$$

Принимая известные значения составляющих звеньев, в соответствии с технологическим процессом и статистическими данными исследований имеем

$\omega_{\ddot{E}_{i\partial}} = \omega_{\ddot{E}_0} = 0 = const$; $\omega_{\ddot{E}_{10}} = 0{,}15$ мм;

$\omega_{\ddot{E}_3} = 0{,}1$ мм; $\omega_{\ddot{E}_7} = 0{,}05$ мм; $\omega_{\ddot{E}_{12}} = 0{,}08$ мм.

Тогда получим: $\omega_{K_2} = 0{,}48$ мм.

Поле рассеивания ω_{C_2} *размера* C_2 определяется как сумма составляющих параметров:

$$\omega_{C_2} = \Sigma\omega_i = \omega_{Л_{op}} + \omega_{Л_{10}} + \omega_{Л_5} + \omega_{Л_0} + \omega_{Л_4} + \omega_{Л_6} + \omega_{Л_{11}} \le T_{C_2} \le 0{,}4 \text{ мм}.$$

Принимаем

$\omega_{Л_{op}} = \omega_{Л_0} = 0$=const; $\omega_{Л_{10}} = 0{,}15$ мм; $\omega_{Л_5} = 0{,}1$ мм;

$\omega_{Л_4} = 0{,}1$ мм; $\omega_{Л_6} = 0{,}05$ мм; $\omega_{Л_{11}} = 0{,}08$ мм.

Тогда $\omega_{C_2} = 0{,}48$ мм.

При анализе толщины стенок размеры K_3 и K_4 исходной заготовки приведены ниже.

Поле рассеивания ω_{K_3} *размера* K_3 определяется суммой полей рассеивания составляющих звеньев:

$$\omega_{K_3} = \Sigma\omega_i = \omega_{Л_{11}} + \omega_{Л_6} + \omega_{Л_4} + \omega_{Л_2} + \omega_{Л_1} + \omega_{Л_8} + \omega_{Л_{13}} \le T_{K_3} \le 0{,}55 \text{ мм}.$$

Принимая известные значения составляющих параметров:

$\omega_{Л_{11}} = 0{,}08$ мм; $\omega_{Л_6} = 0{,}05$ мм; $\omega_{Л_4} = 0{,}1$ мм; $\omega_{Л_2} = 0{,}1$мм;

$\omega_{Л_1} = 0{,}54$ мм; $\omega_{Л_8} = 0{,}05$ мм; $\omega_{Л_{13}} = 0{,}08$ мм,

имеем $\omega_{К_3} = 1$ мм.

Поле рассеивания $\omega_{К_4}$ *размера* $К_4$ определяется суммой составляющих параметров:

$$\omega_{К_4} = \Sigma\omega_i = \omega_{Л_{12}} + \omega_{Л_7} + \omega_{Л_3} + \omega_{Л_2} + \omega_{Л_9} + \omega_{Л_{14}} \le T_{К_4} \le 0{,}55 \text{ мм}.$$

Принимая известные значения составляющих параметров:

$\omega_{Л_{12}} = 0{,}08$ мм; $\omega_{Л_7} = 0{,}05$ мм; $\omega_{Л_3} = 0{,}1$ мм;

$\omega_{Л_2} = 0{,}1$ мм; $\omega_{Л_9} = 0{,}05$ мм; $\omega_{Л_{14}} = 0{,}08$ мм,

имеем $\omega_{К_4} = 0{,}46$ мм.

Необходимо отметить, что приведенные значения полей рассеивания основных геометрических параметров исходной заготовки имеют завышенные значения, так как представленное суммирование не учитывает вероятностные законы распределения и виды производственных погрешностей составляющих параметров.

Для оценки наиболее вероятных значений анализируемых параметров использована методика суммирования составляющих параметров с учетом теоретико-вероятностных законов распределения [10, 14, 15].

Коэффициенты суммирования $К$ производственных погрешностей позволяют определить ожидаемые вероятные значения на основании формулы

$$Âåðω\Sigma = \hat{E}\sum_{i=1}^{n}\omega_i\,, \qquad (3.1)$$

где $К$ – коэффициент теоретико-вероятностного суммирования, полученный на основе композиционных предельных законов распределения составляющих параметров размерных цепей различного вида. Возможные значения коэффициента теоретико-вероятностного суммирования лежат в пределах от 0 до 1.

Методика определения коэффициентов суммирования скалярных погрешностей позволяет учитывать следующие параметры (прил. 1): количество составляющих звеньев анализируемой размерной цепи m; коэффициент, определяющий соотношение систематической и случайной составляющих производственной погрешности μ; отношение максимального поля рассеивания погрешности составляющего параметра к минимальному полю рассеивания параметра анализируемой размерной цепи d; вероятность производственного риска $p,\%$.

Для рассматриваемого примера коэффициенты теоретико-вероятностного суммирования приведены ниже.

Для поля рассеивания толщины керамического стержня $\omega_{\ddot{E}_1} = 0{,}54$ мм, полученного арифметическим суммированием,

$$m = 5;\ \mu = 0{,}3;\ d = 0{,}15/0{,}08 \cong 2;\ p = 0{,}027\%.$$

Тогда $K = 0{,}63$ (см. прил. 1),

$$\text{Вер}\,\omega_{Л_1} = K\omega_{Л_1} = 0{,}63 \cdot 0{,}54 = 0{,}3402 \text{ мм}.$$

Для поля рассеивания ω_{K_2} *размера* K_2, определяющего положение контура лопатки со стороны корыта относительно принятой координатной системы $X_{из}Y_{из}$ измерения, арифметическая сумма

$\omega_{K_2} = 0{,}48$ мм.

Так как $m = 5$; $\mu = 0{,}3$; $d = 0{,}15/0{,}05 = 3$; $p = 0{,}027\%$, то $K = 0{,}68$.

Тогда $\text{Вер}\,\omega_{K_2} = K\omega_{K_2} = 0{,}68 \cdot 0{,}48 = 0{,}3264$ мм.

Для поля рассеивания ω_{C_2} *размера* C_2, определяющего положение контура лопатки со стороны спинки относительно принятой координатной системы $X_{из}Y_{из}$ измерения,

$$\omega_{C_2} = 0{,}48 \text{ мм}.$$

Для $m = 5$; $\mu = 0{,}3$; $d = 0{,}15/0{,}05 = 3$; $p = 0{,}027\%$, согласно прил. 1 $K = 0{,}68$.

Тогда $\text{Вер}\,\omega_{C_2} = K\omega_{C_2} = 0{,}68 \cdot 0{,}48$ м $= 0{,}3264$ мм.

Для поля рассеивания ω_{K_3} *размера* K_3, определяющего толщину стенки со стороны спинки соответствует ($\omega_{K_3} = 1$ мм),при $m = 7$; $\mu = 0{,}3$; $d = 0{,}54/0{,}05 \cong 11$; $p = 0{,}027\%$; по прил.1 $K = 0{,}82$.

Тогда Вер $\omega_{K_3} = K\omega_{K_3} = 0{,}82 \cdot 1 = 0{,}82$ мм.

Для поля рассеивания ω_{K_4} *размера* K_4, определяющего толщину стенки со стороны корыта,

$$\omega_{K_4} = 0{,}46 \text{ мм}.$$

Так как $m = 6$; $\mu = 0{,}3$; $d = 0{,}1/0{,}05 = 2$; $p = 0{,}027\%$, аналогично $K = 0{,}8$ (в прил. 1 не приводится).

Тогда $\text{Вер}\,\omega_{K_4} = K\omega_{K_4} = 0{,}6 \cdot 0{,}46 = 0{,}276$ мм.

Таблица 3.6. Заданные значения допусков на основные параметры исходной заготовки и вероятные значения возможных полей рассеивания этих параметров

Допуски на основные геометрические параметры исходной заготовки, мм	T_{K_2}	T_{C_2}	T_{K_3}	T_{K_4}
	0,4	0,4	0,55	0,55
Вероятные значения полей рассеяния основных параметров исходной заготовки, мм	ω_{K_2}	ω_{C_2}	ω_{K_3}	ω_{K_4}
	0,3264	0,3264	0,82	0,276
Значение коэффициента точности Кт, производства исходной заготовки	0,816	0,816	1,5	0,5

Заданные значения допусков на основные параметры исходной заготовки и вероятные значения возможных полей рассеивания этих параметров сведены в табл. 3.6.

Поле рассеивания толщины стенки лопатки со стороны спинки превышает допустимые, заданные значения на размер K_3. Это объясняется наличием значительной погрешности базирования керамического стержня в модельной литейной форме, а также короблением стержня в процессе сушки и отжига.

Повышение требований к выполнению операций по изготовлению стержней, а также увеличение точности центрирования стержня в модельной форме, улучшение режимов работы печей и оснастки позволят улучшить этот параметр, а следовательно, исключить брак заготовок, возможный на этих операциях.

Для оценки состояния производства исходных заготовок определим коэффициент точности $K_т$ [10].

Коэффициенты точности $K_т$ для анализируемых размеров K_2 и C_2:

$$K_{TK_2} = \omega_{K_2} / T_{K_2} = 0{,}3264/0{,}4 = 0{,}816;$$

$$K_{TC_2} = \omega_{C_2} / T_{C_2} = 0{,}3264/0{,}4 = 0{,}816.$$

На основании этих значений и приведенных рекомендаций можно сделать вывод, что изготовление заготовок ведется с малым запасом точности. Это обуславливает необходимость механической обработки в процессе доводки профиля пера лопатки. Кроме того, следует учесть, что на втором (механическом) этапе обработки заготовок выполнение размеров, определяющий положение елочного замка относительно пера

в пределах допустимого смещения не более 0,2 мм, усложняет процесс формирования окончательных размеров лопаток турбины.

Размер K_3 имеющий коэффициент точности $\hat{E}_{\grave{O}\hat{E}_3}$ = 1,6 приводит к появлению значительного брака по утонению стенки пера лопатки, что удорожает процесс производства и снижает качество продукции. Это требует проведения конструкторско-технологических мероприятий по совершенствованию процесса изготовления комплектующих деталей литейной формы и уменьшения параметров рассеивания режимов обработки.

Размер K_4 выполняется с коэффициентом точности K_{TK_4} = 0,5. Этот коэффициент показывает о качественном исполнении данного параметра лопатки. Коэффициенты точности анализируемых параметров даны в табл. 3.6.

3.2.5. Механическая обработка заготовок

Окончательное формирование параметров лопаток первой ступени турбины осуществляется на втором этапе обработки заготовок. Полученная в литейном производстве исходная монокристаллическая заготовка после контроля выходных параметров поступает на участок механической обработки, где выполняется входной контроль параметров исходной заготовки. Он предусматривает проверку сопроводительных документов и оценку качества поверхностей и материала заготовок на основании согласованных технических требований к заготовительному производству и соответствия заготовки установленным эталонным образцам.

Тщательной проверке подвергаются технологические базовые установочные поверхности 6–10 (см. рис. 3.5), которые формируют «ось» исходной заготовки и обеспечивают качество дальнейшей обработки заготовок в механическом производстве.

Процесс механической обработки можно условно разделить на три основные части:

1) операции №10–80 – обеспечивается формирование профиля замка лопатки и его положение относительно пера;

2) операции № 85–305 – выполняется основная механическая обработка рабочих поверхностей лопаток;

3) операции №310–500 – осуществляются доводочные и отделочные процессы окончательного формирования качественных показателей поверхностей лопаток.

План механической обработки исходной монокристаллической заготовки имеет следующую последовательность;

Первая часть содержит следующие операции.

№10. Заготовка (отливка).

№15. Входной контроль.

№20. Предварительное шлифование торца замка.

№25. Шлифование клина замка.

№30. Электрохимическое шлифование (ЭХШ) выходной кромки лопатки.

№35-60. Предварительная обработка свободных поверхностей ЭХШ.

№65. Окончательное шлифование профиля елочного замка лопатки.

№70. Окончательное шлифование торца замка лопатки.

№75. Шлифование выходного торца замка лопатки.

№80. Шлифование входного торца (Т) замка лопатки.

Вторая часть содержит следующие операции.

№85-100. Предварительное шлифование стыковых поверхностей верхней бандажной полки и нижней замковой полки.

№105-130. Шлифование базовых поверхностей на верхней бандажной полке.

№135-140. Шлифование фасок и стыковых поверхностей под пластину.

№145. Зенкерование выемки под заглушку.

№150-160. Абразивно-полировальнная обработка (АПО) радиусов на замке, уступов на бандажной полке, трактовой поверхности замка и бандажа и других поверхностей.

№165-180. Очистка, промывка и контроль лопатки перед пайкой.

№185-190. Комплектование и пайка заглушки.

№195-200. АПО входной и выходной кромок пера лопатки.

№205-210. Электроэрозионная обработка (ЭЭО) выборок, отверстий и пера лопатки.

№215-225. Зенкерование фасок в отверстиях и промывка внутренней полости лопатки.

№230-245. Абразивно-жидкостная обработка (АЖО) отверстий и выходной кромки.

№250-265. ЭХШ полки замка и контактных поверхностей бандажных полок.

№270-285. Гидроабразивная обработка (ГАО) внутренней полости и АПО полок замка.

№290-305. Промывка и контроль перед нанесением термозащитного покрытия.

Третья часть содержит следующие операции.

№310. Алитирование внутренней полости и отверстий.

№315-330. Глянцевание профиля хвостовика, промывка перед контролем.

№335. Люминесцентный (ЛЮМ) контроль.

№340-350. АЖО круговая, виброшлифование, АПО под покрытие.

№355. Контроль.

№340. Создание термозащитного покрытия.

№345-350. Круговая АЖО, промывка и заливка внутренней полости парафином.

№355-390. Обработка рабочих поверхностей лопатки микро шариками.

№395-415. Промывка горячей водой и шлифование контактных поверхностей бандажных полок.

№420-435. Окончательное шлифование стыковых поверхностей бандажных полок.

№440-450. АПО пазов на торце замка и контура полок.

№455-460. ЛЮМ-контроль, слесарная доводка лопатки.

№465-470. Сборка и сварка ТЭС заглушки.

№475. Рентгеноконтроль.

№480-490. Промывка, контроль.

№495-500. Упаковка и отправка на сборку.

В этом процессе можно выделить отдельные операции, на которых формируются окончательно качественные показатели детали. Тщательность выполнения операций и подготовка к выполнению этих операций является залогом качества продукции.

Первая часть технологического процесса механической обработки заготовок заключается в предварительном формировании основных поверхностей лопаток шлифованием. Предварительные операции обеспечивают снятие основного припуска и напуска, полученного в исходной заготовке, и создают равномерное расположение слоя металла для последующих операций по окончательному формированию профиля елочного замка лопатки.

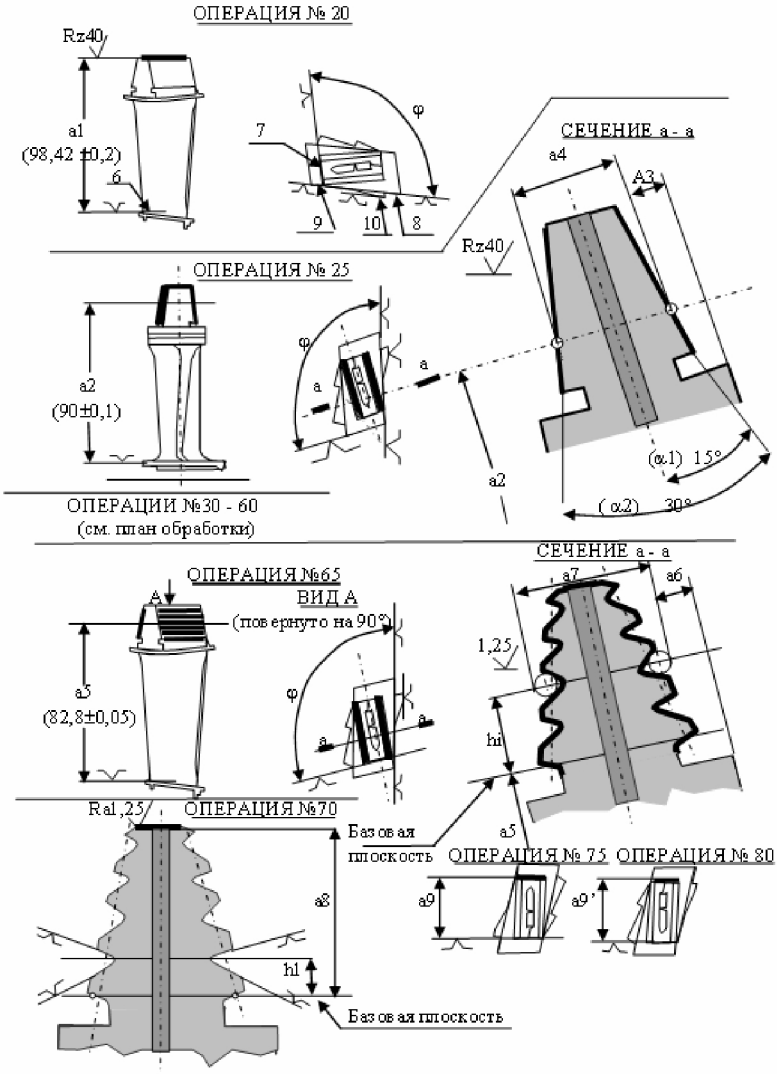


Рис. 3.10. Схема первой части механической обработки лопатки первой ступени турбины

Последовательность обработки основных поверхностей замковой части лопатки и формирование окончательного профиля замка лопатки представлена в графическом виде на рис. 3.10. При этом важнейшей задачей является обеспечение точности расположения замка лопатки относительно пера. Параметры точности расположения пера лопатки относительно технологических баз, полученные в процессе отливки исходной заготовки, необходимо сохранить, а также обеспечить совпадение оси замка с осью технологических баз исходной заготовки. Эта задача выполнима только шлифованием замковой части лопатки. Перо лопатки не должно подвергаться механической обработке со значительным съемом металла, так как профиль пера лопаток на этом этапе уже соответствует окончательному.

Первая механическая операция № 20 выполняется на плоскошлифовальном станке. Заготовка базируется по основным технологическим поверхностям 6-10. Эти поверхности создают ориентирование в технологической системе относительно развернутой призмы (угол призмы φ). Крепление заготовки направлено к центру призмы (точка 0). Такая установка создает минимальные погрешности при ориентировании и обеспечивает надежное закрепление заготовки в технологической системе. Операция проводится при обильном охлаждении зоны обработки содовым раствором №8 на плоскошлифовальном станке (модели 372Б) при следующих режимах обработки: скорости резания v=30 м/с; скорости детали $v_{дет}$ =10 м/мин; продольной подаче t=0,05 мм/дв. ход. Шлифовальный круг имеет прямоугольную форму ПП350×40×127. Состав круга 24А40СТ1К обеспечивает съем значительного припуска и создает шероховатость поверхности не ниже *Rz*=40 мкм.

Контроль геометрических параметров (размер a_1= 98,42±0,2 мм) выполняется на специальном контрольно-измерительном приборе. Допуск на расположение обрабатываемой поверхности относительно базы выполняется в пределах 0,3…0,4 мм для различных типоразмеров лопаток. Операционный размер a_1 задается относительно базовой технологической поверхности *6*, которая расположена в трактовой части пера лопатки. Такое базирование заготовки принято с целью обеспечения минимально возможного смещения обрабатываемой поверхности относительно профиля пера лопатки.

Назначение данной операции заключается в съеме основного припуска и напуска в наиболее сложном месте перехода исходной заготовки в литниковую систему. В этом месте при изготовлении исходной заготовки происходит наиболее интенсивный процесс литья и выхода

литейных газов. В связи с напряженными условиями при литье и с целью создания высокого качества материала у замка лопатки в данной зоне формируют значительный припуск, который в отдельных случаях достигает более 3 мм. После его снятия создается равномерный слой металла для последующей окончательной обработки торца лопатки и удаления дефектного слоя, полученного в процессе отливки исходной заготовки.

На операции №25 производится предварительная, последовательная обработка клина замка лопатки. На этой операции также используются технологические базовые поверхности 6–10, которые обеспечивают точное ориентирование в технологической системе и надежное закрепление заготовки в призме специального станочного приспособления. Целью данной операции является снятие основного припуска по клину замка, который может достигать 2,5 мм и равномерного распределения слоя металла для последующей обработки замка.

Эта операция проводится в два этапа. На первом этапе формируется поверхность клина замка со стороны корыта и обеспечивается размер a_3. Затем производится шлифование поверхности клина замка со стороны спинки и обеспечивается размер a_2. Угловое параметры α_1=15° и α_2=30° достигаются за счет расположения заготовки в технологической системе и правке образующих поверхностей шлифовальных кругов.

Положение клина замка в осевом направлении (ось *Z*) создается благодаря ориентированию его относительно базовой поверхности *6* и выполнению операционного размера a_2 (90±0,1 мм). Допуски на операционные размеры, обеспечивающие профиль клина, задаются в пределах 0,15…0,2 мм (для различных типоразмеров лопаток).

При назначении номинальных размеров операционных размеров создается равномерность припуска на последующую операцию (№65) по глубинному шлифованию профиля замка лопатки. Операция №25 поводится на плоскошлифовальном станке (мод. 372Б) при следующих режимах обработки: скорости резания v=30 м/с; скорости детали $v_{дет}$ =10 м/мин.; продольной подаче t=0,05 мм/дв. ход. Процесс шлифования осуществляется при обильном охлаждении зоны обработки содовым раствором №8. Шлифовальный круг имеет прямоугольную форму ПП350×40×127, состав круга 24А40СТ1К. Шероховатость обрабатываемой поверхности не ниже Rz =40 мкм.

Обработка выходной кромки пера лопатки (операция №30*)* выполняется методом электрохимического шлифования при следующих режимах: напряжение U = 0,01в; v = 30 м/сек.; продольной подачи $S_м$ =

1,5…2 мм/мин. Снятие дефектного слоя после литья с тонких стенок выходной кромки лопатки выполняется на электроалмазном шлифовальном станке. Малая подача заготовки при шлифовании обеспечивает обработку без возникновения прижогов.

Следующие операции – подготовка заготовки к проведению окончательной обработки профиля замка лопатки.

На операции №65 (рис. 3.11) формируется окончательный профиль замка лопатки методом глубинного шлифования. При глубинном шлифовании до значений t = 10…15 мм длина дуги контакта заметно увеличивается. С ростом дуги контакта инструмент-заготовка повышаются нагрузки в технологической системе, поэтому для глубинного шлифования создаются специальные высокопроизводительные станки. Они отличаются числом (один или два) шлифовальных многониточных кругов и расположением их осей [22, 23].

Станки для глубинного шлифования имеют: приборы для правки многониточных шлифовальных кругов, редуктор для уменьшения частоты вращения шлифовального кругов и регулируемый ускоренный подвод и отвод кругов.

Режимы глубинного шлифования замков лопаток елочного типа при скорости круга v=27 м/с приведены в табл.3.7

Таблица 3.7. – Режимы глубинного шлифования замков лопаток елочного типа

Скорость стола, мм/мин	Глубина шлифования t, мм	Глубина правки, мм	Температура шлифования С°
50	1,97	–	1000*
100	1,07	0,2	780*
100	0,05	0,2	750*

Станки-полуавтоматы (ЛШ–233) предназначенные для двухстороннего глубинного шлифования профильных поверхностей замков лопаток ГТД с непрерывной правкой шлифовальных кругов алмазными роликами (рис. 3.11), позволяют обеспечивать высокие показатели качества поверхностей замка. Непрерывная правка шлифовальных кругов и оптимальные режимы обработки на окончательном этапе формирования профиля замка лопатки обеспечивают точное копирование формы профилей этих инструментов. Расположение верхнего контура профиля (поверхность M), относительно нижнего контура профиля (поверхность N), заданные операционным размером a_{MN}= 0±0,01 мм, обеспечивается

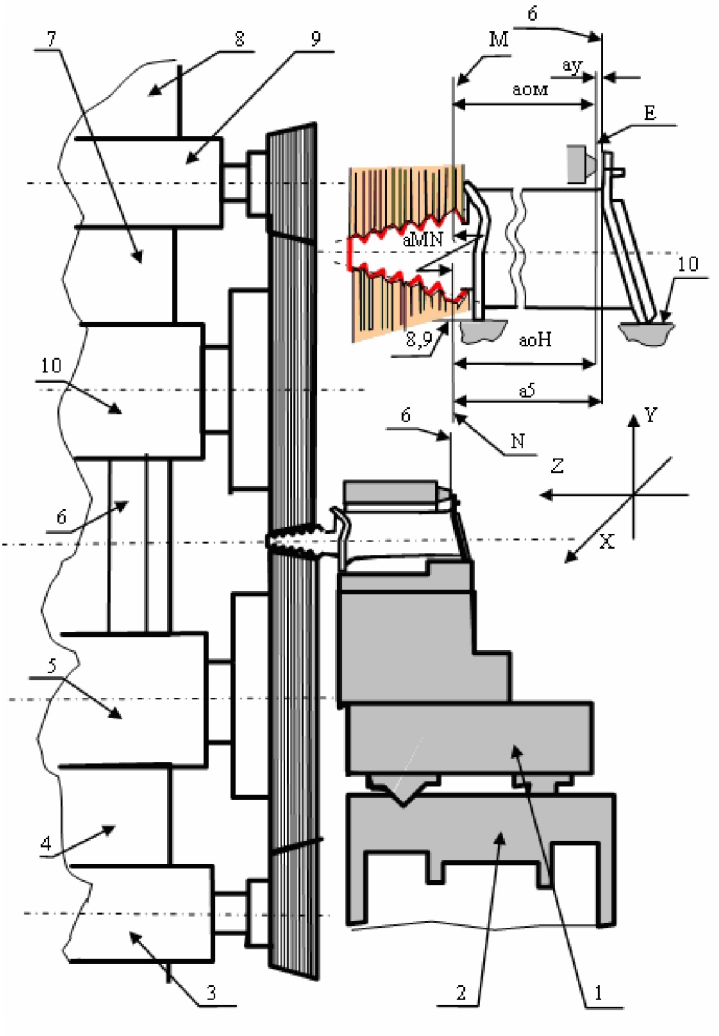


Рис.3.11. Схема глубинного шлифования профиля замка лопатки первой ступени турбины:

1 – стол; *2* – станина станка; *3* – механизм непрерывной правки нижнего круга; *4* – нижняя каретка; *5* – нижняя шлифовальная бабка; *6* – направляющие колонны; *7* – верхняя каретка; *8* – колонна; *9* – механизм непрерывной правки; *10* – верхняя шлифовальная бабка

по первой технологической схеме [11]. Остаточное поле рассеивания погрешности, зависящие от метода обработки ω_o практически равно нулю. Суммарное поле рассеивания погрешности также близко к нулю:

$$\omega a_{MN} = \omega a_{0M} + \omega a_{0N} \cong 0 \leq \mathrm{T}a_{MN} \leq 0{,}02 \text{ мм}.$$

Расположение замка лопатки относительно трактовой части профиля пера лопатки в направлении оси Z на этой операции выполняется с высокой точностью. Ориентирование заготовки в технологической системе осуществляется по поверхности $б$, которая находится в подполочном пространстве лопатки. Размер a_y, определяющий установку заготовки и поле рассеивания этого размера в направлении оси Z, весьма мал.

После выполнения операции №65 профиль елочного замка лопатки соответствует заданным значениям чертежа детали. Комплекс конструкторских поверхностей, который выполнен на операции №65, обеспечивает ориентирование лопатки в диске турбины в направлении координатных осей Y и Z. На этой операции формируется базовая плоскость лопатки (см. рис. 3.2 и рис. 3.10). Относительно этой плоскости и оси замка (оси детали) задаются и обеспечиваются все основные элементы лопатки. В связи с этим качественное выполнение операции №65 является весьма важным. Точность установки на этой операции непосредственно влияет на возможное суммарное смещение $\Delta\Sigma_{см}$ профиля лопатки относительно замка (см. рис. 3.8). На этой операции достигается шероховатость поверхности профиля замка $Ra \leq 2{,}5$ мкм. Зона шлифования обильно охлаждается смазочно-охлаждающей жидкостью АКВОЛ-2.

Контроль геометрических параметров профиля осуществляется на специальных контрольно-измерительных приборах, настройка которых производится по эталонам. Периодически качество лопаток и контрольно-измерительной оснастки проверяют в метрологических лабораториях.

При окончательном шлифовании торцевой поверхности замка (операции №70) базирование заготовки на этой операции выполняется относительно профиля елочного замка. Операционный размер a_8 (см. рис. 3.10) обеспечивает непосредственную связь обрабатываемой поверхности с базовой плоскостью лопатки.

На операции №75 производится чистовое шлифование торца замка лопатки со стороны входной кромки пера. На этой операции формируются окончательные параметры конструкторской поверхности лопатки, которая ориентирует ее в диске турбины по направлению оси X. Бази-

рование заготовки в направлении оси X по входной кромке пера лопатки минимальное смещение этого профиля относительно конструкторской базы.

Операция №80 - окончательная обработка торца замка лопатки со стороны выходной кромки пера лопатки. Операции №70, 75, 80 выполняются на плоскошлифовальных станках типа ПШ – 232.

В комплексе операций первой части технологического процесса механической обработки лопаток формируется важный качественный показатель, который определят точность расположения профиля пера относительно замковой части. Этот показатель характеризует качество проходных сечений лопаточного венца и существенно влияет на КПД турбины, вибрационное состояние роторной части двигателя и другие качественные показатели ГТД.

На основании представленного технологического процесса произведем анализ выполнения качественного показателя лопатки по расположению профиля пера относительно замка полученной из исходной монокристаллической заготовки в первой части механической обработки лопатки.

Результаты анализа размерных связей при формировании профиля пера лопатки относительно технологических базовых поверхностей *6-10* приведены в табл. 3.8. Дальнейшая механическая обработка исходной безприпусковой заготовки на следующем этапе вносит дополнительное смещение замка лопатки относительно принятых технологических баз и соответственно относительно пера лопатки.

Для анализа суммарного смещения профиля пера лопатки, относительно оси замка лопатки рассмотрим размерные связи, учитывающие эти изменения.

В соответствии с комплексной схемой и учетом изменений, прошедших на операции №65, положение образующих поверхностей относительно фактической оси лопатки получает дополнительное смещение, которое определяется погрешностью выполнения размера a_7.

Для размера K_2 суммарное поле рассеивания

$$\omega_{\hat{E}_2} = \sum \omega_i = \omega_{\ddot{E}_{10}} + \omega_{\ddot{E}_{10}} + \omega_{\ddot{E}_5} + \omega_{\ddot{E}_0} + \omega_{\ddot{E}_3} +$$

$$+ \omega_{\ddot{E}_7} + \omega_{\ddot{E}_{12}} + 0{,}5\omega_{\grave{a}_7} + \omega_{\grave{a}_6} \le \grave{O}_{\hat{E}_2} \le 0{,}4 \quad \text{ìì},$$

где $0{,}5\,\omega_{a_7}$ и ω_{a_6} – поля рассеивания погрешностей смещения, полученные на операции №65.

Принимая известные значения полей рассеивания для операционных размеров, имеем

$$\omega_{K_2} = 0 + 0{,}15 + 0{,}1 + 0 + 0{,}1 + 0{,}05 + 0{,}08 + 0{,}05 + 0{,}05 = 0{,}58 \text{ мм}.$$

Таблица 3.8. Основные значения параметров качества изготовления лопаток

Заданные конструкторские размеры лопатки		Изменение точности в процессе изготовления					
		Для исходной заготовки			Механическая обработка		
Размер	Допуск	ω	Верω	К	ω	Верω	К
$К_2$	0,4	0,48	0,326	0,816	0,58	0,412	1,03
$С_2$	0,4	0,48	0,326	0,816	0,58	0,412	1,03
$К_3$	0,55	1	0,82	1,6			1,6
$К_4$	0,55	0,46	0,276	0,5			0,5
$Л_1$	0,1	0,54	0,340				-

Для размера C_2 суммарное поле рассеивания:

$$\omega_{\tilde{N}_2} = \sum \omega_i = \omega_{\ddot{E}_{i\delta}} + \omega_{\ddot{E}_{10}} + \omega_{\ddot{E}_5} + \omega_{\ddot{E}_0} + \omega_{\ddot{E}_4} +$$
$$+ \omega_{\ddot{E}_6} + \omega_{\ddot{E}_{11}} + 0{,}5\omega_{\grave{a}_7} + \omega_{\grave{a}_6} \le \grave{O}_{\tilde{N}_2} \le 0{,}4 \quad ìì \quad .$$

Принимая известные значения полей рассеивания, в соответствии с технологическим процессом имеем:

$$\omega_{C_2} = 0 + 0{,}15 + 0{,}1 + 0 + 0{,}1 + 0{,}05 + 0{,}08 + 0{,}05 + 0{,}05 = 0{,}58 \text{ мм}.$$

Наиболее вероятные значения анализируемых параметров определяются по формуле (3.1):

Для определения наиболее вероятного поля рассеивания размера K_2, определяющего положение контура пера лопатки со стороны корыта относительно оси замка (координаты $X_Д Y_Д$) используем предельную арифметическую сумму полей составляющих звеньев $\omega_{\hat{E}_2} = 0{,}58$ мм. Так как $m = 7$; $\mu = 0{,}3$; $d = 0{,}1$, $\omega_{max}/\omega_{min} = 0{,}15/0{,}05 = 3$; $p = 0{,}027\%$, в соответствии с прил. 1, $K = 0{,}71$.

Тогда Вер ω_{K_2} = К ω_{K_2} = 0,61·0,58 = 0,4118 мм.

Для вероятного поля рассеивания Вер ω_{C_2}, размера C_2, определяющего положение контура пера лопатки со стороны спинки относительно оси замка (координаты $X_Д Y_Д$) и расчетного значения $\omega_{C_2} = 0{,}58$ мм определим вероятностную характеристику размера.

Так как $m = 7$; $\mu = 0{,}3$; $d = 0{,}15/0{,}05 = 3$; $p = 0{,}027\%$, в соответствии с прил. 1, то $K = 0{,}61$.

Тогда Вер ω_{C_2} = К ω_{C_2} = 0,61·0,58 = 0,4118 мм.

Для оценки состояния совместного производства изготовления монокристаллической отливки и первого этапа механической обработки профиля пера лопатки методом глубинного шлифования определим коэффициенты точности процесса в соответствии с методикой [10] и представим основные значения параметров качества изготовления лопаток в табл. 3.8.

Таким образом, по результатам анализа геометрической точности основных параметров при изготовлении лопаток (табл. 3.8) можно сделать вывод: размеры K_2 и C_2 определяющие положение корыта и спинки относительно конструкторских базовых поверхностей выполняются с коэффициентом точности, близким к единице. Это условие требует постоянного контроля и поддержания технологической оснастки в качественном рабочем состоянии. Вероятность выхода геометрических параметров за пределы допустимых значений весьма высокая.

С целью улучшения качественных показателей необходимо наметить конструкторско-технологические мероприятия по совершенствованию процесса обработки и необходимости снижения коэффициента точности.

Коэффициент точности для размера K_3 является чрезвычайно высоким и появление брака по утонению стенки у пера лопатки значительное. Для снижения вероятного поля рассеивания этого параметра также необходимо разработать мероприятия по совершенствованию технологического процесса. Эти мероприятия должны в первую очередь усовершенствовать технологический процесс изготовления керамических стержней (см. поле рассеивания размера $Л_1$ и результаты статистических исследований) и разработать устройства, позволяющие улучшить ориентирование стержня в литейной форме.

Необходимо отметить, что эта задача сложная и требует значительных качественных изменений в технологическом процессе.

Коэффициент точности для размера K_4 выполняется в пределах экономической целесообразности и обеспечивает стабильное формирование заданных конструкторских требований.

Вторая часть технологического процесса-операции №85–305 предусматривает формирование поверхностей замковой полки, контура верхней бандажной полки, обработку свободных поверхностей лопаток, мест перехода отдельных элементов, обработку отверстия под заглушку и его закрытие, изготовление отверстий малого диаметра на входной кромке пера лопатки и доводку профильной части лопатки, которая работает в проточной части ГТД. На этом этапе формируются окончательные показатели множества поверхностей лопаток, которые требуют высокого качества исполнения.

Выполнение этих операций осуществляется при базировании заготовок в технологической системе относительно замка лопатки. С целью уменьшения погрешности, связанной с перекосом заготовки в технологической системе в продольном направлении, так как протяженность базовой поверхности замка мала, используется дополнительная опорная поверхность *12* (см. рис. 3.5).

Отдельные операции этой части технологического процесса представлены на рис. 3.12. Для их выполнения используются плоскошлифовальные станки типа 372Б и ЛШ232. Для шлифования фасонных поверхностей или нескольких простых поверхностей одновременно используется правка шлифовальных кругов по фасонным копирам или специальными копировальными устройствам.

На операциях №85 и 90 предварительное шлифование контура верхней бандажной полки выполняется фасонными кругами, при этом операционные размеры a_{21}=6+0,1 мм (операция №85) и размер a_{27}=6+0,1 мм (операция №90) копируются в процессе шлифования. Операционные размеры a_{25}= 17±0,05 мм (операция №85) и размеры a_{28}=21,525±0,025 мм, a_{29}= 5,65…0,05 мм (операция №90) до базовых установочных поверхностей. С целью удобства измерения размеров a_{25} и a_{28} при выполнении операций используются специальные «габаритки». Эти элементы станочных приспособлений позволяют упростить измерительную оснастку и способ контроля операционных размеров. Операционные угловые размеры a_{22}=38°30′±30′, a_{23}=8°±10′ (операция №85) и размеры a_{26}=38°30′±30′ и a_{30}=8°±10′ (операция №90) обеспечиваются автоматически за счет правильной наладки операции и точной установки заготовки на приспособлении.

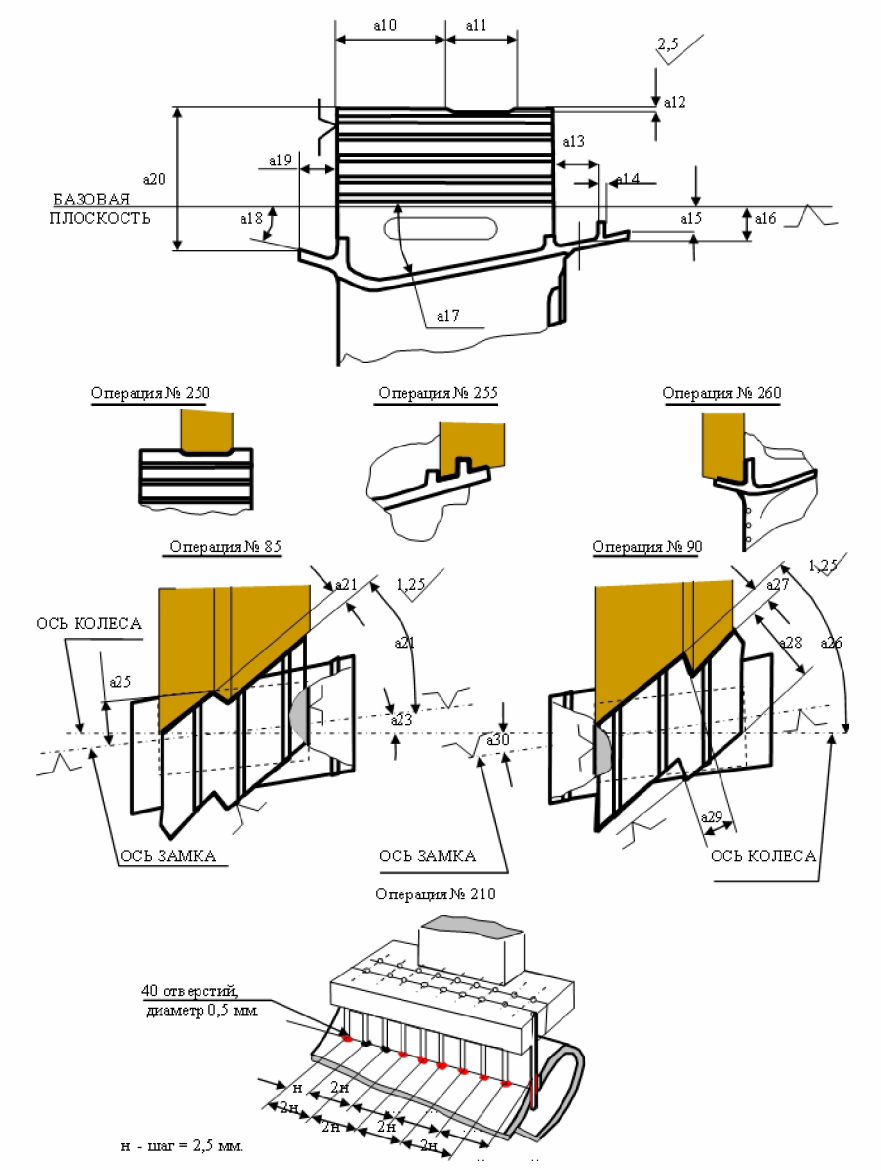


Рис. 3.12. Схемы выполнения операций второй части технологического процесса механической обработки лопаток турбины

На операциях №250, 255 и 260 рассмотрены способы получения шлифованием фасонных поверхностей под замковой полкой лопатки и паза на торце замка. На этих операциях формируются контуры свободных поверхностей (размеры a_{10}, ..., a_{20}). Одна часть этих размеров обеспечиваются за счет копирования контура шлифовального круга (размеры a_{11}, a_{13}, a_{14} и др.) в процессе обработки, а другая часть размеров (a_{15}, a_{18}) определяется наладкой операции и точностью установки заготовки в технологической системе. Остальные размеры выполняются по настройке и требуют периодического контроля в процессе их формирования.

На шлифовальных операциях используются круги формы ПП450×40×203 с составом: 24А16М1-М210К5. Шлифование осуществляется при следующих режимах: v= 30м/с; $v_{дет}$= 56 мм/мин.; t =0,03 мм/дв. ход. В процессе выполнения шлифования шлифовальные круги подвергаются периодической правке с помощью алмазного ролика. При правке с круга снимается припуск равный 0,1 мм. На операции № 260 используется электрохимическое шлифование, которое позволяет интенсифицировать процесс обработки.

Необходимо отметить, что приведенные режимы обработки и специальные методы обработки позволяют исключить прижоги в поверхностном слое обрабатываемого элемента лопатки. Это особенно важно при обработке тонких стенок бандажных полок и мест крепления твердосплавных пластин на верхней бандажной полке. Тонкие стенки пера лопатки обрабатываются в два приема: вначале методом электроэрозионной обработки формируется профиль выборок выходного канала (операции №205), а на последующих операциях производится абразивно-полировальная доводка поверхностей.

В этой части технологического процесса производится обработка малых отверстий на входной кромке пера лопатки (операция №210). Используя специальный инструмент в виде щетки с множеством медных электродов-инструментов, методом электроэрозионной обработки осуществляется «прожигание» отверстий на электроимпульсном станке модели 4Г721. Острые кромки в отверстиях зенкеруются и на последующем этапе обработки подвергаются полированию.

На этом этапе технологического процесса осуществляется подготовка отверстия на верхней бандажной полке под заглушку. Обработка отверстия производится методом зенкерования на вертикально-сверлильном станке (операция №145). После выполнения этой операции проводятся тщательная промывка внутренней полости лопатки го-

рячей водой, чистовая зачистка методом полирования мест припоя, постановка заглушки и пайка, гидроабразивная обработка внутренней полости и абразивно-полировальная доводка контура лопатки.

Вторая часть технологического процесса заканчивается подготовкой заготовки к проведению тщательного контроля перед операцией алитирование. В этой части технологического процесса геометрические параметры заготовки для рабочих поверхностей формируются непосредственно от основной конструкторской базы – замка лопатки. Это позволяет обеспечивать размеры, которые заданы в чертеже детали непосредственно от конструкторской базы.

Третья часть технологического процесса обработки монокристаллической исходной заготовки заключается:

в окончательной отделке поверхностей лопатки;

в создании оптимальных напряжений в конструкторских и рабочих поверхностях;

в проведении контроля качества материала, состояния поверхностей;

в подготовке и проведении операции по сварке заглушки и по созданию многослойного термозащитного покрытия.

Эта часть технологического процесса (операции № 310 – 500) является завершающей и весьма ответственной.

Для повышения усталостной прочности замок лопатки подвергается после окончательной обработки деформационному упрочнению обдувкой микрошариками на дробеметной установке 67-26-005. Лопатки, установленные в специальные кассеты, совершают возвратно-поступатель ное движение относительно вращающихся сопл.

3.2.6.Создание термостойкого покрытия на рабочей поверхности пера лопатки

Для обеспечения надежности и долговечности ГТД, работающих в условиях агрессивных сред, высоких температур, топлив, содержащих серу, в пылевлагонасыщенных районах, когда имеет место попадание солей натрия и кальция в проточную часть двигателя, предъявляют жесткие требования к материалам и технологии получения защитных покрытий рабочей части пера лопатки.

Алюминидные и вакуумные одно– и двухслойные жаростойкие покрытия имеют ограниченный ресурс (400 … 500 часов).

Повышение ресурса серийных ГТД до 1500 часов и выше, установление ресурса на конверсируемых изделиях серии НК не менее 50 тысяч часов привело к совершенствованию этих защитных покрытий [24,25].

В технологии создания термостойких защитных покрытий высоконагруженных деталей используются различные методы:

электронно-лучевое испарение и конденсация в вакууме;

вакуумно-плазменная технология высоких энергий;

плазменное и вакуумно-плазменное напыление в динамическом вакууме;

денатационное напыление;

диффузионное насыщение.

Сущность *электронно-лучевого испарения и конденсации в вакууме* заключается в том, что электрон после прохождения через электрическое поле с разностью потенциалов ускорения приобретает энергию. Первоначально покоящийся электрон, пройдя через поле с разностью в 1 В, имеет скорость v = 595 км/с. При столкновении летящих электронов с поверхностью металла его кинетическая энергия расходуется на возбуждение рентгеновских излучений, образование вторичных электронов и нагрев [26]. Потеря на рентгеновском излучении составляет 0,1%.

Нагрев и испарение напыляемого материала осуществляется в специальных установках (рис. 3.13). Из медных тиглей *4* с охлаждаемыми стенками и дном, которые перемещаются вертикально, происходит испарение материала. Для этого используются литые трубные катоды. Напыление осуществляется плазменными струями. Сжатие дуги в сопле плазмотрона обеспечивает повышение температуры до 10 000 … 15 000 К. Скорость движения потока достигает скорости звука. Этим методом возможно напыление любого материала.

Низкое давление $1{,}64 \cdot 10^3 \ldots 16 \cdot 10^3$ Па (вакуум) обеспечивает получение защитных покрытий на алюминиевой основе (Al – Ni, Al – Cr, Al – Si) из порошковых смесей с галогенидными активаторами. При температуре 773 … 1473 К протекают реакции:

$$NH_4Cl = Nh_4 + HCl;$$

$$2\ NH_3 \leftrightarrow 2N = 3H_2.$$

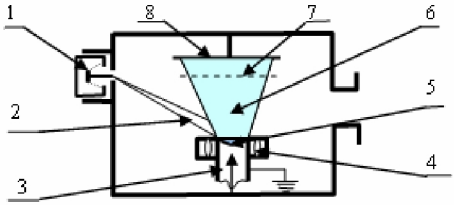


Рис. 3.13. Схема прямого электронно-лучевого испарения из одного источника:

1 – электронно-лучевая пушка; *2* – поток электронов; *3* – испаряемый материал; *4* – водоохлаждаемый тигель; *5* – жидкая ванна; *6* – паровой поток; *7* – заслонка; *8* – подложка

При диффузионном покрытии обеспечивается хорошее сцепление слоя с основой.

Однослойные многокомпозиционные (Me – Cr – Al – Y) покрытия исчерпали свой ресурс (300…400 часов). Совершенствование технологии и средств *нанесения многослойных теплозащитных металлокерамических покрытий* (ТЗП) и улучшение их качественных показателей термическими способами находят все большее применение в производстве ГТД [27, 28]. В качестве керамического материала при создании ТЗП используются низко теплопроводные оксиды на основе ZrO_2; Al_2O_3; CeO_2; Y_2O_3; BeO; HfO_2 и т.д. Структура слоя металл-керамика имеет следующую форму и состав:

1) $ZrO_2 – Y_2O_3$;

2) Me – Cr – Al – Y (подслой иттрий);

3) подложка.

Керамический слой наносится на подслой иттрия плазменного напыления или охлаждения в вакууме. Оптимальное содержание компонент в металлическом подслое иттрия обеспечивает качественное соединение слоев.

Трехслойное термобарьерное покрытие имеет вид:

1) $ZrO_2 – MgO$ (170 мкм);

2) керамика (65%) – металл (35%) (115 мкм);

3) Ni – Cr – Al – Y (100 мкм);

4) подложка.

Структура керамических покрытий зависит от способа нанесения слоев. Так, при плазменном напылении формируется слоистая арочная схема, а при электронно-лучевом напылении – столбчатая. С целью

улучшения качественных показателей работы столбчатой структуры керамического многослойного покрытия используются термические приемы, позволяющие в процессе создания слоя обеспечивать упрочнение поверхности термобарьерного покрытия.

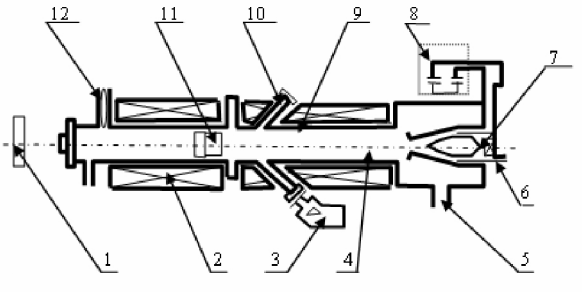


Рис. 3.14. Схема электродинамичсекого импульсного ускорителя плазмы:
1 – манипулятор; *2* – магнитные катушки; *3* – инфракрасный полихроматор; *4* – плазмопровод; *5* – вакуумная система; *6* – напуск воздуха; *7* – эжектор импульсного напуска газа; *8* – разрядник; *9* – магнитные зонды; *10* – оптические окна; *11* – калиметр; *12* – вакуумный затвор

В процессе нанесения многослойного покрытия используется электронно-лучевая установка УЭ-175М и многоместная оснастка, обеспечивающая сложные пространственные перемещения заготовок в паровом потоке. Движение заготовок в данной технологической системе осуществляется с помощью автоматизированной системы управления манипулятором. Электродинамический импульсный ускоритель плазмы (рис. 3.14) создает поток импульсной плазмы и обеспечивает формирование покрытия.

Для создания многослойного защитного покрытия используются различные методы и способы их совершенствования. В табл. 3.9 приведены методы нанесения теплозащитных покрытий, режимы нанесения и качественные показатели слоя.

Процессы, происходящие при создании термостойкого многослойного покрытия, имеют весьма сложные зависимости на микроуровне поверхностного слоя. Ионно-плазменное напыление, ионная имплантация, лучевая обработка требуют глубокого изучения процессов на макро-, мезо– и микроуровне с учетом состояния кристаллических решеток материалов заготовок и нанесенных слоев. Исследования, проводимые в направлении оптимизации технологических параметров, новых высоких технологий имеют потенциальный запас надежности и качества изделий ГТД.

Таблица 3.9. – Методы нанесения теплозащитных покрытий

Фирма (страна)	Технология	Покрытие	Рабочие температуры, °С	Толщина слоя, мкм	
				металл	керамика
АО «Самарский НТ им. Кузнецова»	Электронно-лучевая	Термо–, коррозионно– и эрозионно-стойкое	1000	100 … 150	100 … 130
АО «Пермские моторы»	Вакуумно-плазменное напыление	Жаро-, коррозионно-стойкое	1000	До 100	-
АО «НПО ВИАМ»	Электронно-лучевая	ТЗП термостойкое	1000	100 … 150	100 … 130
НПО «Сатурн им. Люлька»			1100	100 … 130	
Военно– воздушная академия им. Жуковского	Диффузионно-вакуумная плазменная	ТЗП термо– и коррозионностойкое	1100	До 100	100 … 150
АО «Уфимское моторостроительное ПО» (Россия)	Вакуумно-плазменная	Жаростойкое	1000	До 100	100 … 150
НПО «Порошковая металлургия» (Беларусь)	Плазменное напыление в динамичсеком вакууме	ТЗП с беспористыми связующим слоем и с термостойким слоем	1000	100 … 200	150
НПО «Машпроект» им. С.Д. Колосова (Украина)	Электронно-лучевая	ТЗП термо– и эрозионностойкое	1000	100 … 200	100 … 150

Продолжение табл. 3.9

Фирма (страна)	Технология	Покрытие	Рабочие температуры, °С	Толщина слоя, мкм	
				металл	керамика
Соединенное Королевство	Плазменное напыление в динамическом вакууме	ТЗП с повышенной термо– и коррозионной стойкостью	1000	100	480
МТИ (Германия)		Беспористое связующее системы	1000	100	400
Howmet Turbine Corp.			1000	100 … 120	40
NASA		ТЗП с повышенной термостойкостью	1200	100 … 200	280… 380
Lewis Research Center	Электронно-лучевая		-	-	-
Union Carbide Corp.	Плазменное напыление	ТЗП с повышенной термо– и коррозионной стойкостью	1100	150 … 200	250…300
General Electric		ТЗП с повышенной коррозионной стойкостью	1000	100 … 200	280
Westing Hause Electric Corp.		ТЗП для наземных ГТД	900	120	380
United Technologies Corp. (США)	Электронно-лучевая	ТЗП эрозионно-стойкое	1100	100 …200	100…200

3.3. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК ПЕРВОЙ СТУПЕНИ КОМПРЕССОРА

3.3.1. Технологический анализ чертежа детали, назначение, условия работы и материалы

Лопатки ротора компрессора являются ответственными элементами ГТД. От качества работы компрессора зависит надежность и экономичность всего изделия.

Вращение компрессора выполняется от различных ступеней турбины ГТД. Так, вращение роторов низкого и среднего давления ГТД, представленного на рис. 1.1, осуществляется от 2 и 3 ступени турбины. Соединение ступеней турбины и компрессора обеспечивается шлицевым элементом вала ротора низкого давления.

Рабочие лопатки компрессоров испытывают значительные осевые и радиальные нагрузки. Профильная часть – перо – кроме растяжения от центробежных сил, изгиба и кручения испытывает переменные напряжения от вибрационных нагрузок. При взлете и крейсерском режиме летательного аппарата температурный режим в компрессоре изменяется. Эти изменения проявляются во всех ступенях компрессора. Так, первая ступень компрессора, имеющая крупногабаритные лопатки, испытывает изменения температурного режима от +50 до – 50°С.

Для производства лопаток первой ступени компрессора используются качественные материалы. В современных ГТД, используются легированные стали или титановые сплавы (см. табл. 3.2). Лопатка первой ступени компрессора, показанная на рис. 3.15, изготовлена из титанового сплава ВТ-9.

В конструкции лопаток выделены три элемента – замок (хвостовик), перо и бандажные полки. ***Хвостовик*** представляет собой замок елочного типа. В отличие от замка турбины первой ступени (см. рис. 3.2) количество гребешков елки сведено до минимума. В представленной конструкции используется один елочный паз. Этот замок обеспечивает основное ориентирование лопатки в диске компрессора первой ступени и создает координатную систему данной детали. Поверхности профиля замка являются основными конструкторскими поверхностями и выполняются с высокими показателями качества:

1. Точность угла профиля елочного паза ± 5′.
2. Точность шага елки ± 0,01 мм.

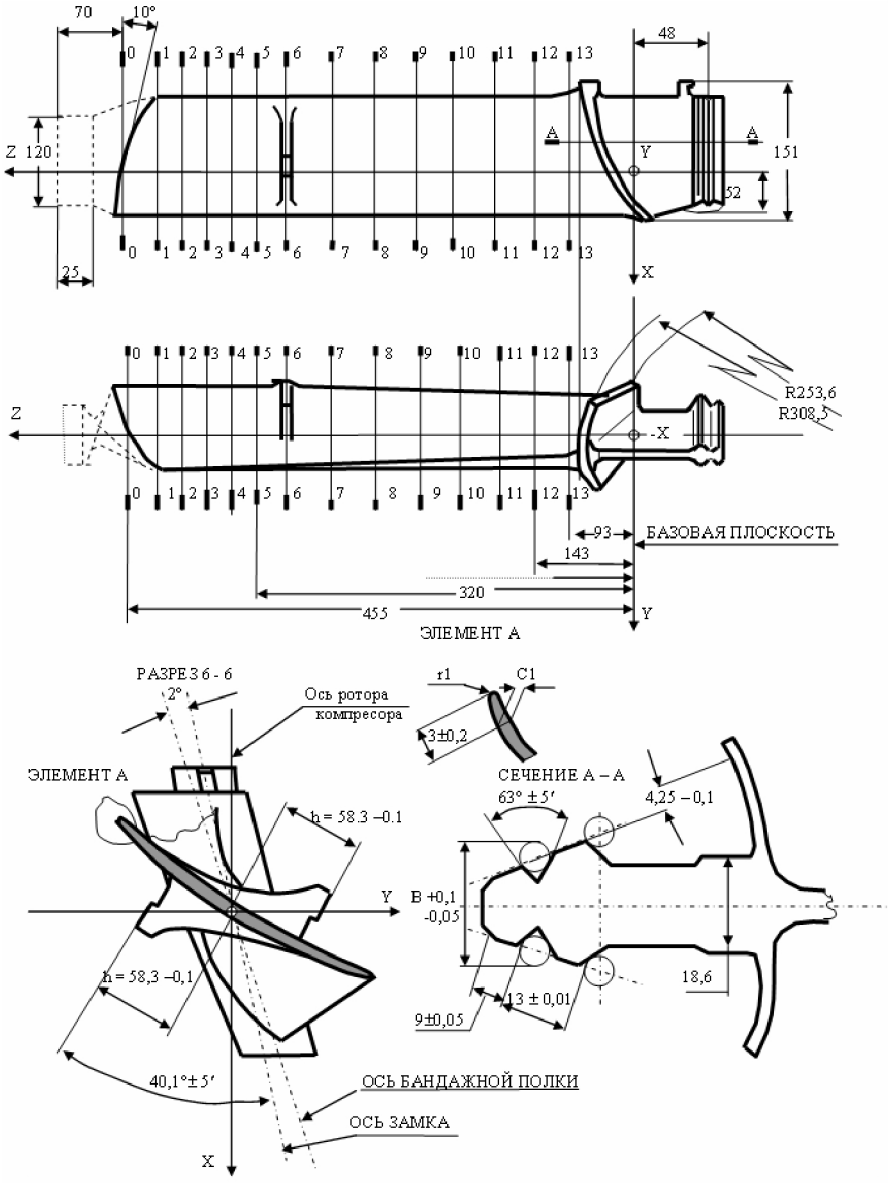


Рис. 3.15. Лопатка первой ступени компрессора

3. Смещение пазов елки относительно друг друга не более 0,01 мм.

4. Допуск на толщину замка (размер *B*) 0,1…0,15 мм. При установке лопаток в диск в процессе сборки по размеру *B* осуществляется подбор и проверка необходимого зазора. Зазор между лопаткой и диском должен обеспечить заданное значение качки лопатки.

5. Шероховатость поверхностей елки 0,32 мкм по *Ra*.

Перо лопатки имеет протяженную сложную пространственную форму. Длина рабочей части пера составляет 500 мм с переменным профилем в поперечных сечениях вдоль оси *Z* (см. рис. 3.15.). Эти сечения строго ориентированы относительно базовой расчетной плоскости и профиля елочного замка. В поперечных сечениях заданы расчетные значения точек, определяющих профиль спинки и корыта лопатки в координатной системе *X,Y*. Значения этих координат задаются табличным способом. Поперечные сечения повернуты относительно друг друга и создают закрутку пера лопатки.

6. Точность профиля пера лопатки в координатной системе *XYZ* определяется допустимым отклонением от заданных номинальных значений каждой точки профиля пера. В нашем примере это отклонение составляет 0,5 мм. Угловая прогрешность при этом по закрутке пера не должна превышать значения ± 20′.

Толщина пера *C*1(элемент *A*) имеет малые значения. На входе и выходе воздушного потока в компрессор она для различных сечений изменяется от 1,45 мм (сечение *0 – 0*) до 2,5 мм (сечение *13 – 13*). При этом допуск на толщину колеблется от 0,2 до 0,1 мм. Высокие требования предъявляются также для формирования радиуса перехода на входе и выходе пера лопатки. Радиус при этом изменяется от 0,5 мм для сечения *0 – 0* до 0,8 мм для сечения *13 – 13*.

Шероховатость профиля пера лопатки должна быть не ниже 0,32 мкм по *Ra*.

В средней части пера лопатки расположены ***опорные бандажные полки***, сложной профильной конструкции (разрез *6 – 6*). Эти полки играют роль вспомогательных конструкторских поверхностей лопаток, и на их опорные поверхности наносятся твердосплавные покрытия карбида вольфрама и карбида титана (WC, TiC). Средние бандажные полки, соединяясь между собой, создают единое опорное кольцо в первом колесе ротора компрессора.

7. Точность стыковочных элементов полок и положение их относительно координатной системы лопатки задается в пределах 0,1 мм (размер *h* = 58,3 … 0,1). Перекос стыковочных поверхностей допускается

не более ± 5′. Поверхности полок обеспечивают плавный переход в профильную часть пера лопатки. Шероховатость поверхностей профиля полки не ниже 2,5 мкм по *Ra*.

В нижней части лопатки расположена замковая полка, которая имеет сложную пространственную форму с изменяемыми параметрами сечений. Нижние полки лопаток создают замкнутый контур в колесе компрессора и обеспечивают плавность подачи воздуха в компрессор. Изменение зазора между этими полками выполняется в пределах 0,1…0,2 мм.

Верхняя часть пера лопатки имеет фасонную поверхность, образующая которой точно расположена относительно профиля елочного замка и входной кромки пера лопатки. От точности выполнения этого профиля зависит зазор между вершинами лопаток и корпусом колеса статора компрессора первой ступени.

Рабочий профиль пера лопатки бандажных полок, карманов (облегчений) и замка подвергается упрочняющим методам обработки с целью создания на образующих поверхностях сжимающих напряжений. Эти операции выполняются гидродробеструйной обработкой или другими упрочняющими методами. Высокие требования предъявляются также к состоянию поверхностей лопаток, на которых не допускаются трещины, прижоги и другие дефекты производства.

Материал лопатки относится ко второй группе контроля, которая предусматривает тщательную проверку качества каждой лопатки. Для партии лопаток готовится также специальный образец, который подвергается лабораторному анализу. Требования, предъявляемые к качеству лопаток компрессора весьма высокие.

Способы получение исходных заготовок для таких деталей и использование традиционных и специальных методов при дальнейшей обработке определяют выходные качественные и экономические показатели производства.

Исходные заготовки лопаток первой ступени компрессора получают методом штамповки. При этом могут быть получены заготовки повышенной точности, с малыми припусками на механическую обработку. Штамповки невысокой точности (в пределах IT–15, IT–16, ЛТ–8, ЛТ–9) увеличивают припуски и напуски и требуют значительного количества операций для дальнейшей механической обработки.

Выбор способа получения исходной заготовки и соответствующего технологического процесса механической обработки может быть обоснован качественными и экономическими показателями производства.

При использовании исходных заготовок невысокой точности требуется введение специальных технологических прибылей для надежного и точного ориентирования заготовок в технологических системах на этапе черновой обработки. Кроме того, с целью уменьшения коробления заготовок в процессе механической обработки необходимы специальные приемы по ориентированию заготовок в технологических системах и использовать термические стабилизирующие операции.

Ниже рассмотрен технологический процесс изготовления лопаток первой ступени компрессора, исходная заготовка которой, получена методом ***горячей штамповки обычной точности***. При создании такой заготовки были определены пути, уменьшающие трудоемкость изготовления и выполнения перечисленных показателей качества лопаток первой ступени компрессора.

При разработке технологического процесса ставились следующие задачи:

1) создать исходную заготовку методом горячей штамповки с минимальным припуском по перу лопатки;

2) создать технологические прибыли для ориентирования и надежного закрепления заготовки в технологической системе;

3) разработать технологическую оснастку и применить метод ориентирования исходной заготовки в технологической системе относительно профиля пера лопатки с целью распределения (оптимизации) припуска на различных этапах механической обработки;

4) использовать станки с ЧПУ для обработки сложных контуров на фрезерных операциях;

5) использовать отделочные методы обработки шлифованием и полированием с гарантированием качественных показателей поверхностей;

6) создать систему контроля качества исполнения операций на основных этапах производства.

3.3.2. Маршрутная технология изготовления лопаток

Штамповка и все связанные с ней операции выполняются по технологии горячей штамповки обычной точности. Обработка ведется на кривошипно-шатунных прессах в соответствии с техническими требованиями (рис. 3.16).

Штамповочные уклоны составляют 7…10°. Радиусы перехода поверхностей штамповки выполняются в пределах R = 4 мм. Допуски на

горизонтальные и вертикальные размеры в соответствии с IT–15. Допустимое смещение по линии разъема штампов не более 2 мм. Перо исходной заготовки подвергается профилированной обкатке. Следы от облоя по всему контуру заготовки не должны превышать 1 мм.

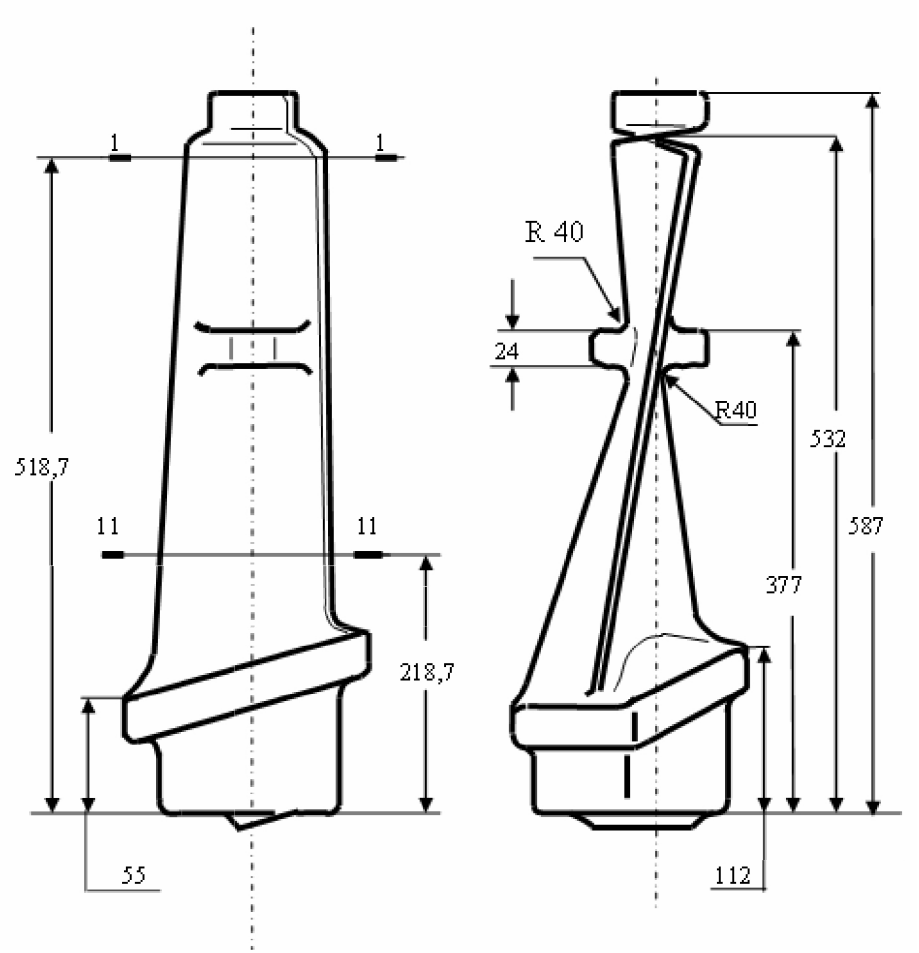


Рис. 3.16. Исходная заготовка лопатки первой ступени компрессора

3.3.3. Механическая обработка заготовок

Формирование параметров лопаток первой ступени компрессора осуществляется на механическом участке после проведения входного контроля исходных заготовок. В процессе контроля проверяются сопроводительные документы, наличие маркировочных клейм о выполнении технических требований к заготовке и осуществляется внешний осмотр.

Процесс механической обработки условно можно разделить на 5 основных частей:

В первой части (предварительной) технологического процесса (операции №5 – 195) обеспечивается формирование базовых установочных поверхностей и выполняется съем основного припуска у заготовки. Эта часть технологического процесса заканчивается проведением стабилизирующей термической обработки и контролем качества материала заготовки.

Во второй части технологического процесса (операции №200 – 415) осуществляется точное ориентирование заготовки относительно профиля пера лопатки, обновляются базовые установочные поверхности и проводятся чистовые операции для основных элементов лопаток. Эта часть технологического процесса предусматривает также проведение рентгеновского контроля материала и выполнения промежуточного контроля основных параметров заготовки.

В третьей части технологического процесса (операции №420 – 470) производится окончательная доводка рабочих поверхностей лопаток, осуществляется контроль трещин и проводится стабилизирующий отжиг, исправляющий возможные дефекты.

В четвертой части технологического процесса (операции №475 – 505) производится отрезка технологической прибыли, доводка различных элементов лопатки и выполняется контроль микроструктуры материала на специальных образцах. В этой части технологического процесса производится проверка собственных частот колебания лопаток и окончательный контроль геометрических параметров.

В пятой части технологического процесса (операции №510 – 620) осуществляется гидродробеструйная обработка рабочих поверхностей лопаток, нанесение твердосплавного покрытия (WC, TiC) на стыковые поверхности промежуточных полок и окончательная доводка ответственных элементов лопаток.

План механической обработки исходной заготовки имеет следующую последовательность операций:

Первая часть содержит следующие операции:

№5. Заготовка (штамповка).

№10. Входной контроль.

№15 – 50. Предварительное фрезерование свободных поверхностей.

№55. Распределение припуска и зацентровка заготовки.

№60–85. Фрезерование предварительное технологической прибыли и «подошвы» замка.

№90–145. Фрезерование трактовых поверхностей пера лопатки со стороны спинки и корыта.

№150–180. Фрезерование профиля полок, облегчений, карманов и других элементов.

№185–195. Резка, подготовка образцов и термическая обработка.

Вторая часть содержит следующие операции:

№200. Распределение припуска и зацентровка заготовок.

№205–225. Окончательное фрезерование технологической прибыли и подготовка плоских установочных баз.

№230–245. Обработка поверхностей замка, входной и выходной кромок пера, скосов и других элементов.

№250–260. Фрезерование профиля замка и проведение контроля качества.

№265–270. Фрезерование профиля пера лопатки.

№275–300. Фрезерование контура промежуточной полки лопатки.

№305. Шлифование профиля пера.

№310–405. Фрезерование бандажной полки, карманов, выборок, фасонных уступов и других элементов.

№410. Рентгеновский контроль.

№415. Промежуточный контроль геометрических параметров лопатки.

Третья часть содержит следующие операции:

№420. Перенос маркировки.

№425–430. Слесарная обработка.

№435. Окончательное фрезерование стыковых поверхностей промежуточных полок.

№440–445. Полирование профиля пера, травление и контроль качества.

№ 450. Стабилизирующий отжиг.

№455. Глянцевание.

№460–470. Исправление дефектов и маркировка заготовки.

Четвертая часть содержит следующие операции:

№510. Аттестация гидродробеструйной установки.

№515–525. Гидродробеструйная обработка пера, полок, замка и других элементов лопатки.

№530. Слесарная обработка.

№535. Контроль упрочнения поверхностей лопатки.

№540–565. Слесарная обработка и нанесение твердосплавного покрытия.

№570–575. Шлифование стыковых поверхностей со стороны спинки и корыта лопатки.

№580–585. Контроль.

№590–595. Слесарная доводка.

№600–610. Травление, исправление дефектов.

№615–620. Окончательный контроль.

Представленный план обработки показывает всю последовательность изготовления лопаток в механическом цехе и проведение сопутствующих операций в различных подразделениях производства.

В этом процессе можно выделить отдельные операции и комплекс операций по формированию качественных показателей детали, определить последовательность удаления припусков для различных элементов заготовки.

Первая часть технологического процесса механической обработки начинается с предварительного формирования профиля заготовки. При этом осуществляется фрезерование следов от облоя на входных и выходных торцах замка и технологической прибыли, удаляются следы от облоя у контура пера и других элементов исходной заготовки.

Проведение этих работ необходимо для качественного исполнения операции по распределению припуска и зацентровке отверстий на операции №55, а также для уменьшения величины снимаемого слоя металла на последующих операциях технологического процесса.

Операция №55 является одной из важнейших для качественного проведения первой части и всего технологического процесса. Подготовка базовых установочных поверхностей (центровых отверстий) выполняется таким образом, чтобы обеспечить равномерное распределение припуска по рабочему профилю пера лопатки относительно технологических базовых поверхностей. Достигается совмещение средней плоскости пера с плоскостью симметрии контрольно-измерительного прибора. С этой плоскостью совмещаются базовые установочные элементы (центровые отверстия).

Основное ориентирование исходной заготовки в технологической системе этой операции осуществляется относительно крайних (2-2 и 10-10) сечений (рис. 3.17). В *i*-м поперечном сечении лопатки показан способ ориентирования исходной заготовки между шаблонами специального контрольно-измерительного прибора (КИП). Этот прибор установлен в технологической системе сверлильного станка и совмещен с поворотным устройством.

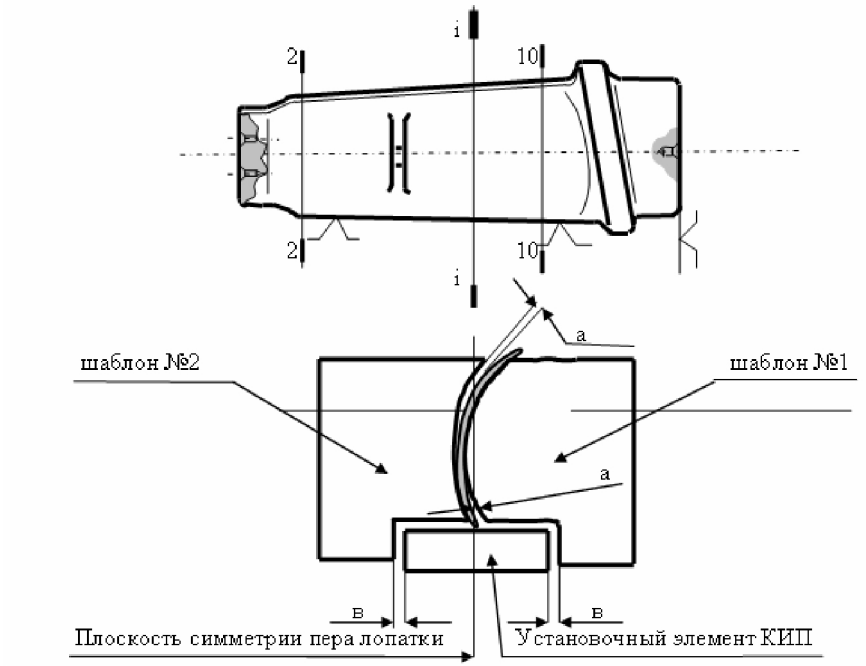


Рис. 3.17. Схема распределения припуска у исходной заготовки (операция №55)

Перед выполнением зацентровки исходная заготовка размещается между установочными, подвижными шаблонами, которые при поперечном перемещении по специальным пазам, обеспечивают ориентирование лопатки относительно сложно-фасонного профиля пера. При установке заготовки в поперечном направлении производится контроль размеров *а* и *в*. Размер *а* не должен превышать 1,5 мм, а разность раз-

меров *в* относительно установочного элемента КИП должна быть не более 1 мм.

При достижении этих размеров заготовка фиксируется и закрепляется с помощью специальных прижимов в технологической системе. Затем производится поворот заготовки на угол 90° относительно оси симметрии. После этого со стороны замка лопатки обрабатывается одно центровочное отверстие. Затем заготовка поворачивается на угол 180° и со стороны технологической прибыли обрабатываются два центровочных отверстия.

В осевом направлении, заготовка на этой операции, ориентирована относительно «подошвы» замка. В продольном направлении она базируется по входной кромке пера. Такое ориентирование заготовки и обработка установочных базовых отверстий обеспечивает распределение припуска и его оптимизацию по всему контуру пера лопатки для первой части технологического процесса.

Обработка центровочных отверстий производится на вертикально-сверлильном или радиально-сверлильном станке. При обработке используются стандартные центровки из инструментальной стали Р9. Режимы резания при этой обработке: скорость резания v = 5 м/мин, (число оборотов n = 200 мин$^{-1}$); подача S_o = 0,054 мм/об. При этом обеспечивается шероховатость рабочих поверхностей центровочных отверстий до Rz = 10 мкм.

Однако подготовленные базовые отверстия не могут служить хорошими установочными элементами для проведения черновых операций первой части технологического процесса, так как при снятии значительных припусков и напусков возникают большие усилия резания и надежность закрепления заготовки по этим базовым отверстиям не гарантируется. В связи с этим *на операциях* №60–85 формируются методом фрезерования плоские базовые установочные поверхности (рис. 3.18). Эти поверхности размещаются на технологической прибыли и на нижней бандажной полке заготовки.

Для осевого ориентирования (в направлении оси Z) используется «подошва» опорной части замка лопатки. Комплекс этих плоских базовых поверхностей создает условия для ориентирования заготовки в технологической системе с помощью станочных приспособлений, имеющих установочные элементы в виде призм.

Фрезерование на операциях №60–85 позволило обеспечить точное положение плоских базовых поверхностей относительно «нулевого луча». Шероховатость данных плоских поверхностей выполняется не ху-

же Rz=10 мкм. На операциях по подготовке базовых поверхностей используются станки с ЧПУ, которые за несколько проходов (два–три прохода) обеспечивают качество этих базовых поверхностей. Режимы фрезерования составляют: v = 70 м/мин, (число оборотов фрезы n = 200 мин$^{-1}$) и продольная подача $S_м$ = 70–85 мм/мин.

Комплекс подготовленных базовых поверхностей позволяет устанавливать заготовки с необходимой точностью в технологической системе и проводить черновые операции с повышенными режимами обработки, удаляя припуски значительной величины.

На подготовленных плоских технологических базах проводится этап черновой обработки лопатки. *Операции №90 – 175* – съем основного припуска по контуру спинки и корыта лопатки, по контуру промежуточной и бандажной полок, обрабатываются облегчения, карманы и предварительно формируется профиль замка.

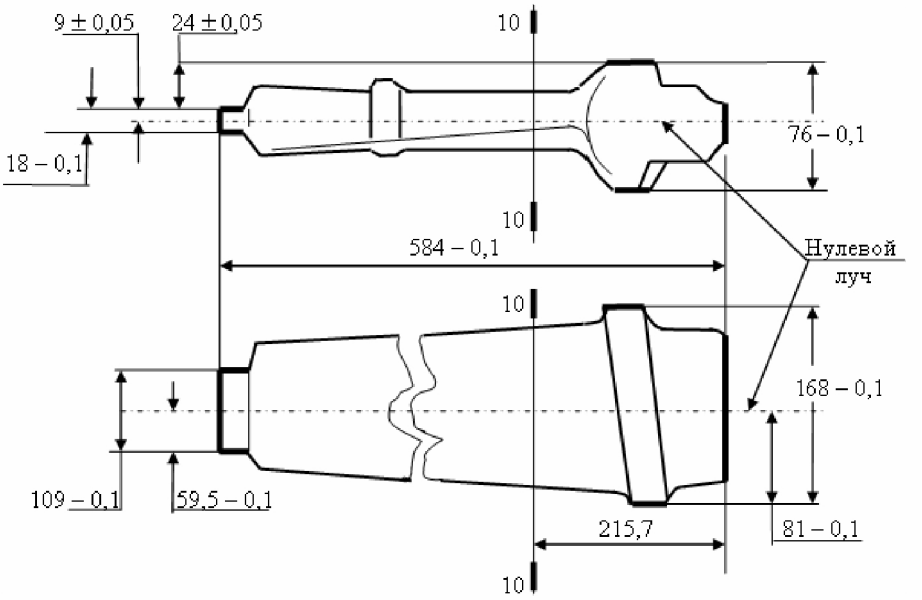


Рис. 3.18. Схема расположения плоских базовых установочных поверхностей заготовки

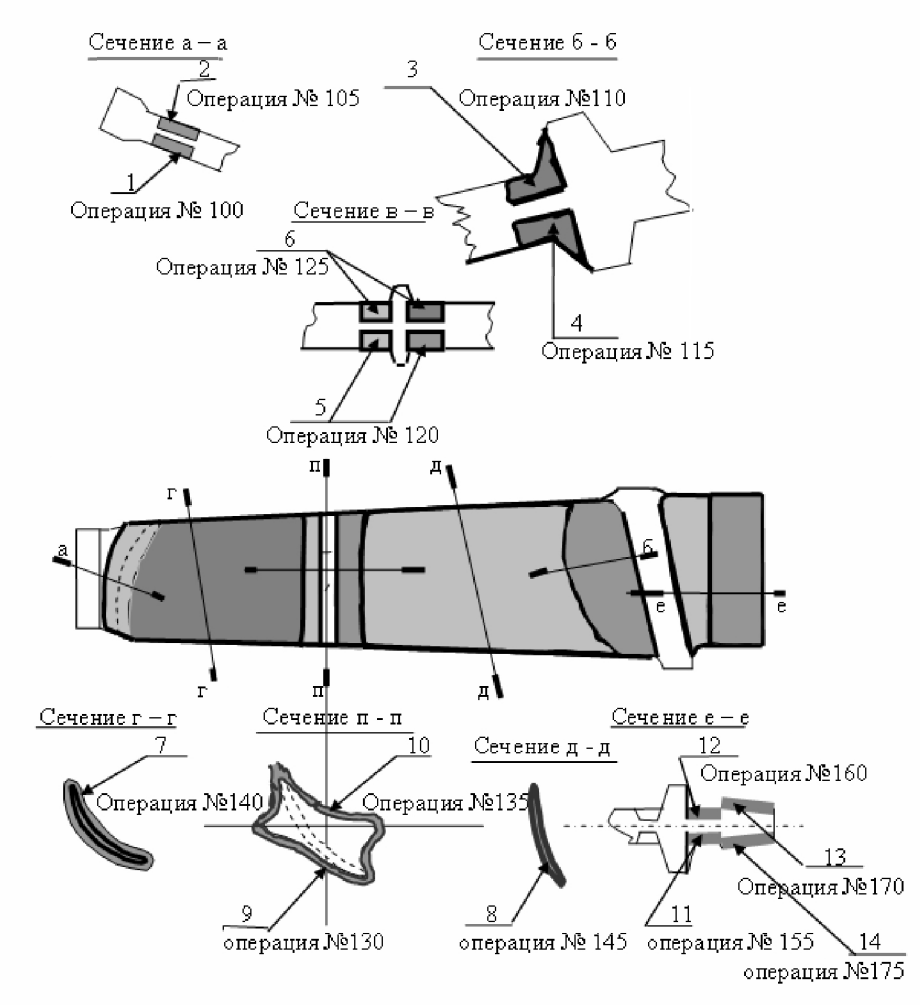


Рис. 3.19. Схема последовательности удаления припуска на черновом этапе обработки

На рис. 3.19 представлена схема последовательности удаления припуска на черновых операциях первой части технологического процесса. Показанные сечения, номера операций и удаляемых элементов позволяют раскрыть порядок обработки, применяемое оборудование, режущий инструмент и способы контроля необходимых параметров.

Для рассматриваемого примера для удаления припусков на сложных пространственных поверхностях используются горизонтально – фрезерные станки (*операции* №100 – 125) со специальными поворотными приспособлениями. Обработка этих поверхностей осуществляется дисковой фрезой шириной 60 мм, диаметром 160 … 200 мм. На этих операциях удаляется значительный слой металла, который определяется напусками, полученными за счет штамповочных уклонов, смещения по линии разъема штампов и других особенностей изготовления исходной заготовки.

Режимы резания для удаления такого слоя металла следующие: скорость резания v = 20–25 м/мин (частота вращения n = 30 мин$^{-1}$); продольная подача $S_м$ = 65 мм/мин; число проходов – 4.

На операциях №130 – 135 используются вертикально-фрезерные станки с ЧПУ модели 6М13ГН1. Обработка фасонных поверхностей заготовки производится концевыми (пальцевыми) фрезами диаметром ∅48…50 мм по специальным управляющим программам. Режимы резания при этом: скорость резания v = 50 м/мин (n =315 мин$^{-1}$); продольная подача $S_м$ = 60 мм/мин.

Операции №140–145 выполняются на копировально-фрезерных станках модели КА–65. При обработке используется метод строчного фрезерования узкой дисковой фрезой. Ширина строки составляет 3 мм. Диаметр фрезы равен 185–200 мм. Образующая профиля фрезы в поперечном направлении выполнена в виде радиуса. Режимы резания, при этом соответствуют: v = 30 м/мин (n =315 мин$^{-1}$); продольная подача $S_м$ = 150 мм/мин; число проходов – 1.

При обработке карманов, облегчений и предварительного профиля замка (*операции №155 – 175*) используются горизонтально– и вертикально-фрезерные станки.

При выполнении этого комплекса операций технологического процесса осуществляется снятие основного слоя металла. Контур заготовки приближают к контуру готовой детали. При этом создают минимально возможный слой припуска на дальнейшую получистовую и чистовую обработку. Величина этого слоя и его неравномерность в партии заготовок зависит от многих причин. При обработке крупнога-

баритных компрессорных лопаток первой ступени такими причинами являются:

точность ориентирования и закрепления заготовок в технологических системах на операциях;

величина коробления от обработки и изменения напряженного состояния заготовок.

С целью снижения этих влияний в процессе формирования профиля заготовок на черновом этапе используется распределение припусков, оптимизация режимов обработки на операциях и проведение стабилизирующей термической обработки.

3.2.4. Анализ качественных показателей заготовки после выполнения первой части технологического процесса

Для оценки величин припусков, удаляемых в черновой части технологического процесса, и определения точности заготовки, полученной после снятия основного припуска, произведем комплексный размерный анализ. На рис. 3.20 представлена полная комплексная схема размерных связей технологического процесса изготовления лопаток первой ступени компрессора.

Для первой части технологического процесса (операции №5 – 195) в качестве анализируемых параметров определим:

1) точность выполнения размеров (C_i^* и K_i^*) профиля пера лопатки для одного поперечного сечения в первой части технологического процесса;

2) величины удаляемых припусков (Zc_1, $Zк_1$) по перу лопатки в черновых операциях (№ 140 –145);

3) величины ожидаемых припусков (Zc_2, $Zк_2$) и их неравномерность для чистовой части технологического процесса.

Размеры C_i^* и K_i^* определяют положение профиля пера лопатки относительно плоскости симметрии замка. В первой части технологического процесса рассмотрим выполнение этих размеров относительно плоскости симметрии пера, так как на этом этапе замок лопатки еще не выполнен.

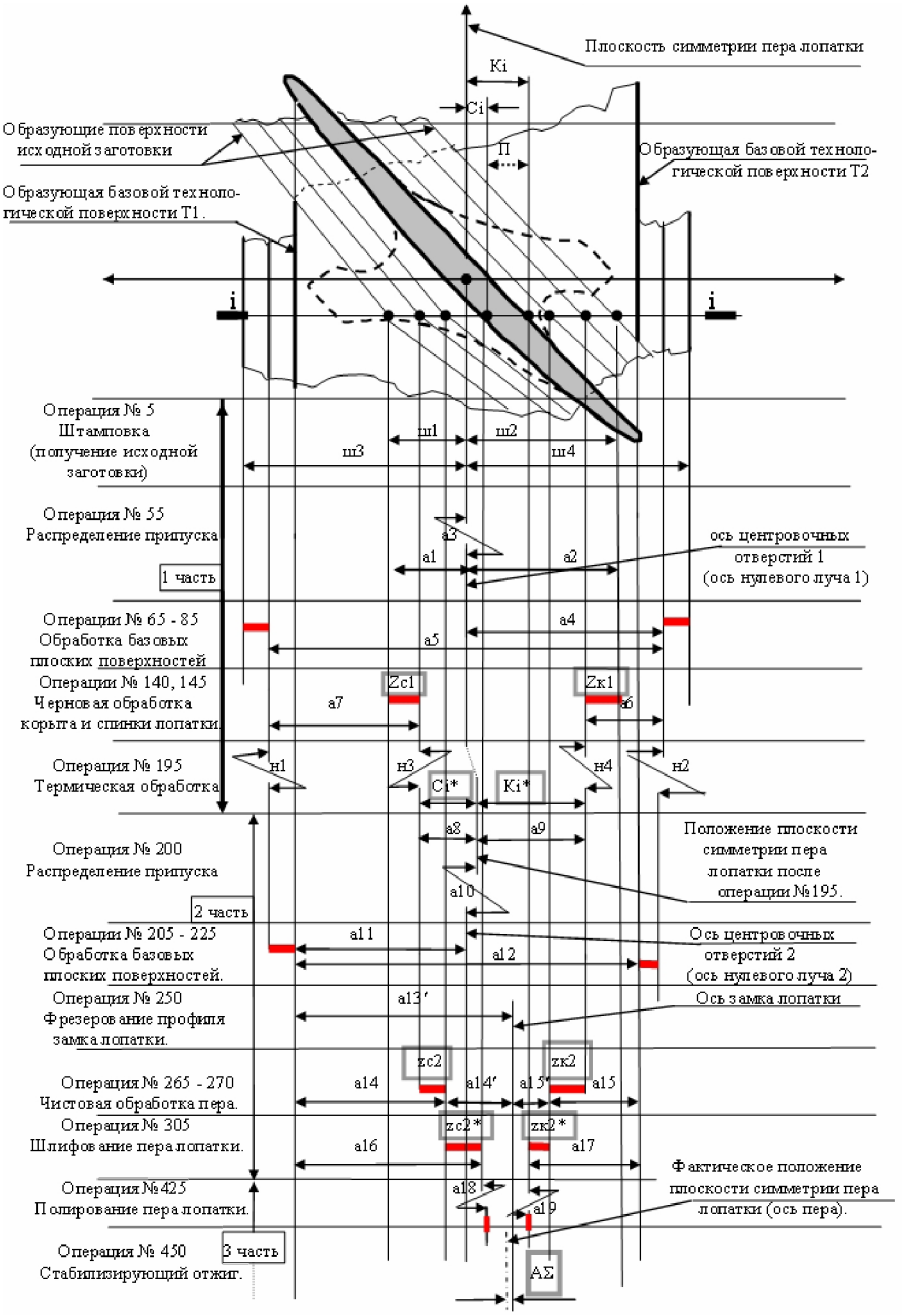


Рис. 3.20. Комплексная схема размерных связей технологического процесса изготовления лопатки первой ступени компрессора

При изготовлении исходной заготовки на операции №5 выполняются размеры, определяющие положение следующих образующих поверхностей:

$ш_1$ – спинки исходной заготовки относительно плоскости симметрии;

$ш_2$ – корыта исходной заготовки относительно плоскости симметрии;

$ш_3$ и $ш_4$ – технологических баз исходной заготовки относительно плоскости симметрии пера.

На операции №55 производится распределение припуска по перу лопатки с целью равномерного расположения слоя металла со стороны спинки и корыта относительно подготавливаемых базовых поверхностей для последующих операций технологического процесса. На этой операции выдерживаются размеры, которые определяют:

$а_1$, $а_2$ – точность расположения профиля исходной заготовки относительно профиля установочных шаблонов КИП (см. операцию №55);

$а_3$ – положение плоскости симметрии профиля пера исходной заготовки, относительно установочного элемента КИП (операция №55);

$а_4$, $а_5$ – положение образующих плоских базовых поверхностей относительно центровочных отверстий (операции №60–85);

$а_6$, $а_7$ – размеры, определяющие положение образующих корыта и спинки пера заготовки относительно плоских базовых установочных поверхностей при черновом фрезеровании (операции № 140–145).

На операции №195 осуществляется термическая обработка исходной заготовки. Эта операция проводится после съема значительного припуска на черновом этапе обработки и предусматривает снятие внутренних напряжений в материале заготовки, приведение ее в равновесное состояние и создание оптимальной структуры материала. В процессе проведения этой операции температурные воздействия приводят к изменению геометрической формы заготовки, которые проявляются в виде коробления. С целью уменьшения величин коробления используются различные технологические приемы.

В комплексной схеме изменения геометрических параметров на операции №195 представлены размерами:

$н_1$, $н_2$, определяющими изменение положения образующих базовых поверхностей заготовки относительно первоначального;

$н_3$ –$н_4$, определяющими изменение положения образующих поверхностей спинки и корыта пера лопатки относительно первоначального.

На основании изменений, которые произошли при обработке и заданных значений операционных размеров произведем анализ первой части технологического процесса (операции № 5 – 195).

Таблица 3.10. – Операционные размеры изготовления компрессорной лопатки

Размер	Операционный размер, мм			Операции
	Номинальное значение	Верхнее отклонение	Нижнее отклонение	
ш1	3,25	+ 2,6	– 0,65	№5. Штамповка
ш2	15	+ 2,6	– 0,65	
ш3	42,5	+ 2,6	– 0,65	
ш4	42,5	+ 2,6	– 0,65	
а1	по шаблону	+ 1,5	0	№55. Распределение припуска
а2	по шаблону	+ 1,5	0	
а3	0	+ 0,5	– 0,5	
а4	38	+ 0,05	– 0,05	№65-85. Обработка базовых поверхностей
а5	76	0	– 0,1	
а6	27,1	+ 0,25	– 0,4	№ 140, 145. Черновая обработка пера.
а7	36,1	+ 0,25	– 0,4	
н1	0	+ 0,25	– 0,25	№ 195. Термическая обработка
н2	0	+ 0,25	– 0,25	
н3	0	+ 0,25	– 0,25	
н4	0	+ 0,25	– 0,25	
а8	2,9	+ 0,4	0	№ 200. Распределение припуска
а9	10	+ 0,4	0	
а10	0	+ 0,25	– 0,25	
а11	37,5	0	– 0,05	№ 205 – 225, 250. Фрезерование плоских установочных баз и замка
а12	75	+ 0,025	-0,025	
а13	39,87	0	-0,1	
а14	35,2	+ 0,3	0	№ 265, 270. Чистовая обработка пера
а15	28,2	+ 0,3	0	
а16	35,3	+ 0,5	0	№ 305. Шлифование пера лопатки.
а17	28,3	+ 0,5	0	
а18	0	+ 0,05	0	№425. Полирование пера лопатки.
а19	0	+ 0,05	0	

В первой части технологического процесса обеспечивается точность выполнения профиля пера лопатки. При анализе обеспечения качественных показателей в первой части технологического процесса используем заданные значения операционных размеров для изготовления компрессорной лопатки. Эти значения представлены в табл. 3.10. Они позволяют провести анализ основных параметров технологического процесса.

На основании комплексной схемы размерных цепей и операционных размеров определим взаимосвязанные размерные цепи.

1. *Определение положения образующей контура спинки лопатки после черновой обработки пера*. Рассмотрим размерную цепь, определяющую выполнение размера C_i^* в одном, *i-м* – сечении. В соответствии с операционными размерами и комплексной схемой размерных цепей первой части технологического процесса, запишем общее уравнение размерной цепи:

$$C_i^* \pm н_3 - a_7 + a_5 - a_4 \pm a_3 = 0.$$

Тогда уравнение замыкающего звена C_i^*, имеет вид:

$$C_i^* = \pm н_3 - a_7 + a_5 - a_4 \pm a_3.$$

Операционный размер

$$н_3 = 0 \pm 0{,}5\mathrm{T}_{н_3},$$

где $T_{н_3}$ – допуск на операционный размер $н_3$.

Для выполнения операции № 195 (термическая обработка) допуск $T_{н_3}$ задается на возможное изменение геометрической формы заготовки.

Это изменение проявляется в виде коробления заготовки в процессе проведения операции. Оно не должно искажать исходную форму в пределах заданного допуска $\pm 0{,}5T_{н_3} = \pm 0{,}25$ мм.

Операционный размер

$$a_3 = \pm 0{,}5\,T_{a_3},$$

где T_{a_3} допуск на операционный размер a_3.

Для операции № 55 (распределение припуска) допуск T_{a_3} задается на возможное смещение контура пера лопатки относительно плоскости

симметрии КИП. Это смещение выполняется в пределах заданного допуска $\pm 0{,}5\ T_{a_3} = \pm 0{,}5$ мм.

Представленные операционные размеры в вышеприведенном уравнении имеют знаки (±), которые определяют возможные направления смещения. Таким образом, звенья $н_3$ и a_3 являются векторными величинами и определяют характер составляющих звеньев размерной цепи. Эти звенья зависят не только от величины возможного изменения модуля вектора, но и от знака, определяющего направление вектора. Это направление может изменяться от 0 до 2π в рассматриваемой плоскости. Таким образом, имеет место комбинированная размерная цепь, в которой одна часть составляющих звеньев – скалярные величины, а другая – векторные.

На основании этого возможные предельные отклонения замыкающего звена размерной цепи:

$$C_{imax}^{*} = н_{3max} - a_{7min} + a_{5max} + a_{4min} + a_{3max};$$
$$C_{imin}^{*} = -н_{3max} - a_{7max} + a_{5min} - a_{4max} - a_{3max}.$$

Тогда поле рассеивания анализируемого размера C_i^{*} будет иметь вид:

$$\omega_{C_i^{*}} = C_{imax}^{*} - C_{imin}^{*},$$

или

$$\omega_{C_i^{*}} = 2\rho н_3 + \omega a_7 + \omega a_5 + \omega a_4 + 2\rho a_3,$$

где величины $\rho н_3$ и ρa_3 определяют поля рассеивания модулей векторов составляющих параметров размерной цепи.

Принимаем условие, что поле рассеивания ω_i должно быть равно или меньше заданного значения допуска T_i на составляющие параметры и имеем:

$$\omega_i \le T_i$$

В этом случае, арифметическая сумма, определяющая возможное предельное поле рассеивания замыкающего звена рассматриваемой размерной цепи составит:

$$\omega_{C_i^{*}} = 0{,}5 + 0{,}65 + 0{,}1 + 0{,}1 + 1 = 2{,}35 \text{ мм}.$$

Определим возможные предельные значения размера C_i^{*} в первой части технологического процесса.

$$C_{imax}^{*} = н_{3max} - a_{7min} + a_{5max} + a_{4min} + a_{3max};$$
$$C_{imax}^{*} = 0{,}25 - 35{,}7 + 76 - 37{,}95 + 0{,}5 = 3{,}10 \text{ мм};$$

$$C_{imin}^{*} = -\,н_{3max} - a_{7max} + a_{5min} - a_{4max} - a_{3max};$$

$$C_{imin}^{*} = -\,0{,}25 - 36{,}35 + 75{,}9 - 38{,}05 - 0{,}5 = 0{,}75 \text{ мм}.$$

$$\omega_{C_i^*} = C_{imax}^{*} - C_{imin}^{*} = 2{,}35 \text{ мм}.$$

Использование выражения (3.1) позволяет, установив характер составляющих звеньев, законы распределения производственных погрешностей и допустимый процент риска, определять в соответствии с формулами, или номограммами (см. прил. 1, 2) необходимые коэффициенты K.

Аналитическое определение коэффициента теоретико-вероятностного суммирования для комбинированных размерных цепей зависит от следующих составляющих:

$$K = f(m, n, d, c, c^*, \mu, \eta, p\ldots),$$

где, m – количество скалярных составляющих звеньев размерной цепи; n – количество векторных составляющих звеньев размерной цепи; d – отношение поля рассеивания i-го звена размерной цепи к минимальному полю рассеивания для скалярных составляющих; c – отношение поля рассеивания j–го звена размерной цепи к минимальному полю рассеивания для векторных составляющих; c^* – отношение минимального поля рассеивания модуля векторной составляющей к минимальному полю рассеивания скалярной величины; μ – отношение систематической составляющей к полному полю рассеивания производственной погрешности для скалярных звеньев размерной цепи; η – отношение систематической составляющей к полному полю рассеивания модуля вектора производственной погрешности для векторных звеньев размерной цепи; p – процент производственного риска.

Коэффициент теоретико-вероятностного суммирования K, получаемый в соответствии с формулами [11], или графиками (см. прил. 2), позволяет определить ожидаемые значения анализируемых параметров в соответствии с характером составляющих звеньев.

Этот коэффициент позволяет учитывать композиционные законы распределения производственных погрешностей, учитывать долю систематических и случайных составляющих различного вида, а также использовать экономические показатели производственных процессов. Необходимо отметить, что применяемая методика объективно отражает процессы, происходящие в производстве деталей и позволяет использовать коэффициент K в возможных пределах:

$$0 \le K \le 1.$$

В рассматриваемой размерной цепи имеем пять составляющих звеньев:

три скалярных a_7, a_5 и a_4. Поля рассеивания этих звеньев соответственно

$$\omega_{a_7} = 0{,}65 \text{ мм}, \ \omega_{a_5} = 0{,}1 \text{ мм}, \ \omega_{a_4} = 0{,}1 \text{ мм};$$

два векторных звена $н_3$ и a_3. Модули векторов этих звеньев распределяются в пределах:

поле рассеивания вектора $н_3$ определяется короблением заготовки на операции №195. Оно ограничено допуском

$$T_{н_3} = 0{,}5 \text{ мм, т. е. } \omega_{н_3} \le T_{н_3} \le 0{,}5;$$

поле рассеивания вектора a_3 определяется допустимой разностью размеров *в* при установке исходной заготовки относительно КИП на операции №55. Эта разность ограничена в пределах допуска $T_{a_3} = 1$ мм, т.е. $\omega_{a_3} \le T_{a_3} \le 1$.

для $m = 3$, $d = 0{,}65/\ 0{,}1 = 6{,}5$, $\mu = 0{,}3$,

для $n = 2$, с = $\omega_{a_3} / \omega_{н_3} = 1/0{,}5 = 2$, $\eta = 0{,}3$,

для размерной цепи имеем:

$c^* = \omega_{н_3} / \omega_{a_4} = 0{,}5/0{,}1 = 5$,

принимая $p = 0{,}027\%$, в соответствии с прил. 2, определяем коэффициент теоретико-вероятностного суммирования K: $K = 0{,}73$.

На основании данного коэффициента находим наиболее вероятное значение поля рассеивания образующей спинки лопатки после чернового фрезерования и термической обработки на операции №195:

$\text{Вер}\,\omega_{C_i^*} = \text{К} \cdot \omega_{C_i^*} = 0{,}73 \cdot 2{,}35 = 1{,}9055$ мм.

2. *Определим положение образующей профиля корыта лопатки после черновой обработки пера.* Рассмотрим размерную цепь, определяющую выполнение размера K_i^*. Уравнение размерной цепи для этого случая имеет вид:

$$K_i^* \pm н_4 + a_6 - a_4 \pm a_3 = 0.$$

Тогда уравнение замыкающего звена

$$K_i^* \pm н_4 + a_6 - a_4 \pm a_3.$$

На основании этого уравнения получим предельные значения замыкающего звена:

$$K_{imax}^{*} = н_{4max} + a_{6max} - a_{4min} + a_{3max} = 0{,}25 - 26{,}7 + 38{,}05 + 0{,}5 = 12{,}1 \text{ мм};$$
$$K_{iin}^{*} = - н_{4min} + a_{6min} - a_{4max} - a_{3max} = 0{,}25 - 27{,}35 + 37{,}95 - 0{,}5 = 9{,}85 \text{ мм}.$$

Поле рассеивания анализируемого размера K_i^* будет иметь вид:

$$\omega_{K_i^*} = 2\rho_{T_4} + \omega_{a_6} + \omega_{a_4} + 2\rho_{a_3},$$

где ρ_{T_4} и ρ_{a_3} - поля рассеивания модулей векторов составляющих параметров; а ω_{a_6} и ω_{a_4} - поля рассеивания скалярных составляющих этой же размерной цепи.

Принимая значение полей рассеивания составляющих параметров размерной цепи в соответствии с первой частью технологического процесса имеем:

$$\omega_{K_i^*} = 0{,}5 + 0{,}65 + 0{,}1 + 1 = 2{,}25 \text{ мм}.$$

По методике [11] определим для скалярных (m = 2) и для векторных (n =2) составляющих значения параметров:

$\mu = 0{,}3$; $\eta = 0{,}3$; $d = 0{,}65/0{,}1 = 6{,}5$; $c = 0{,}5/0{,}5 = 1$;

$c^* = 0{,}65/0{,}5 = 1{,}3$; $p = 0{,}027$ %.

В соответствии с прил. 2 имеем $K = 0{,}78$, а следовательно,

Вер $\omega_{K_i^*} = 0{,}78 \cdot 2{,}25 = 1{,}755$ мм.

3. *Определение удаляемого слоя с поверхности заготовки при черновой обработке пера лопатки со стороны спинки*. Рассмотрим размерную цепь:

$$ш_1 \pm a_3 + a_4 - a_5 + a_7 - z_c = 0.$$

В этой цепи z_c определяет удаляемый слой металла со стороны спинки пера лопатки в первой части технологического процесса. Этот параметр является замыкающим звеном представленной размерной цепи:

$$z_{c1i} = ш_1 \pm a_3 + a_4 - a_5 + a_7.$$

Тогда,

$$z_{c1imax} = ш_{1max} + a_{3max} + a_{4max} - a_{5min} + a_{7max} =$$
$$= 5{,}85 + 0{,}5 + 38{,}05 - 75{,}9 + 36{,}35 = 4{,}85 \text{ мм};$$

$$z_{c1imin} = ш_{1min} - a_{3max} + a_{4min} - a_{5max} + a_{7min} =$$
$$= 2,6 - 0,5 + 37,95 - 76 + 35,7 = 0,25 \text{ мм};$$
$$\omega_{z_{c1i}} = z_{c1imax} - z_{c1imin} = 4,85 - 0,25 = 4,6 \text{ мм}.$$

Поскольку $m = 4$; $d = 5$; $\mu = 0,3$; $n = 1$; $c = 1$; $\eta = 0,3$; $c^* = 6,5$; $p = 0,027\%$, имеем по прил. 2 $K = 0,9$.

Тогда,

$$\text{Вер}\,\omega_{z_{c1i}} = 4,14 \text{ мм}.$$

4. *Определим удаляемый слой металла с поверхности заготовки при черновой обработке со стороны корыта*. Рассмотрим размерную цепь:

$$z_{к1i} - a_6 + a_4 \pm a_3 - ш_2 = 0.$$

В этой цепи $z_{к1i}$ определяет удаляемый слой металла со стороны корыта пера лопатки в первой части технологического процесса. Этот параметр является замыкающим звеном представленной размерной цепи:

$$z_{к1i} = a_6 - a_4 \pm a_3 + ш_2.$$

Тогда,

$$z_{к1maxi} = a_{6max} - a_{4min} + a_{3max} + ш_{2max} = 27,35 - 37,95 + 0,5 + 17,6 = 7,5 \text{ мм};$$
$$z_{к1imin} = a_{6min} - a_{4max} - a_{3max} + ш_{2min} = 26,7 - 38,05 - 0,5 + 14,35 = 2,5 \text{ мм};$$
$$\omega_{z_{к1i}} = z_{к1imax} - z_{к1imin} = 5 \text{ мм}.$$

Так как $m = 3$; $d = 5$; $\mu = 0,3$; $n = 1$; $c = 1$; $\eta = 0,3$; $c^* = 6,5$ и $p = 0,027\%$, имеем по прил. 2 $K = 0,93$.

Тогда

$$\text{Вер}\,\omega_{z_{к1i}} = 4,65 \text{ мм}.$$

5. *Определение ожидаемого припуска на чистовом этапе обработки пера лопатки со стороны спинки*. Рассмотрим размерную цепь:

$$z_{c2i} - a_{14} + a_{11} \pm a_{10} - a_8 = 0;$$
$$z_{c2i} = a_{14} - a_{11} \pm a_{10} + a_8.$$

Тогда

$$z_{c2imax} = a_{14max} - a_{11min} + a_{10max} + a_{8max} = 39 - 37,45 + 0,25 + 0,4 = 2,2 \text{ мм};$$
$$z_{c2imin} = a_{14min} - a_{11max} - a_{10max} + a_{8min} = 38,5 - 37,5 - 0,25 + 0 = 0,75 \text{ мм};$$
$$\omega_{z_{c2i}} = z_{c2imax} - z_{c2imin} = 1,45 \text{ мм}.$$

Так как $m = 3$; $d = 1$; $\mu = 0{,}3$; $n = 1$; $c = 1$; $\eta = 0.3$; $c^* = 1$; $p = 0.027\%$, имеем по прил. 2 $K = 0{,}85$.

Тогда

$$\text{Вер}\,\omega_{z_{c2i}} = 1{,}2325 \text{ мм}.$$

6. *Определение ожидаемого припуска на чистовом этапе обработки пера лопатки со стороны корыта*. Рассмотрим размерную цепь:

$$z_{к2i} - a_9 \pm a_{10} - a_{11} + a_{12} - a_{15} = 0;$$
$$z_{к2i} = a_9 \pm a_{10} + a_{11} - a_{12} + a_{15}.$$

Тогда

$$z_{к2imax} = a_{9max} + a_{10max} + a_{11max} - a_{12min} - a_{15min} = 0{,}4 + 0{,}25 + 37{,}5 - 74{,}975 + 39 = 2{,}175 \text{ мм};$$

$$z_{к2imin} = a_{9min} - a_{10max} + a_{11min} - a_{12max} - a_{15max} = 0 - 0{,}25 + 37{,}45 - 75{,}025 + 38{,}5 = 0{,}675 \text{ мм};$$

$$\omega_{z_{к2i}} = z_{к2imax} - z_{к2imin} = 1{,}5 \text{ мм}.$$

Так как, $m = 4$ (2); $d = 1$; $\mu = 0.3$; $n = 1$; $c = 1$; $\eta = 0{,}3$; $c^* = 1$ и $p = 0{,}027\%$, имеем по прил.2 $K = 0{,}87$.

Тогда

$$\text{Вер}\,\omega_{z_{к2i}} = 1{,}305 \text{ мм}.$$

Выше показаны значения параметров в направлении принятого сечения *i-i*. Если рассматривать величины параметров в другом направлении, то их значения изменятся. В связи с этим величины припусков по нормали к обрабатываемой поверхности заготовки могут быть скорректированы в зависимости от угла наклона профиля пера заготовки к рассматриваемому сечению. Так, если принять в соответствии с чертежом угол наклона профиля пера лопатки к образующей базовой технологической поверхности равным 45° для данного сечения, то возможные значения припусков по перу лопатки составят в 1,41 раза меньше приведенных выше.

Расчетные значения точности профиля пера заготовки и величин удаляемых припусков в первой части технологического процесса представлены в табл. 3.11.

Таблица 3.11. – Возможные значения параметров на операциях технологического процесса, мм

Параметр	max	min	ωi	Верωi	Операции
Первая часть					
Ci*	3,10	0,75	2,35	1,9055	Операции № 5–195
Ki*	12,1	9,85	2,25	1,755	
Zc1i	4,85	0,25	4,6	4,14	
Zк1i	7,5	2,5	5,0	4,65	
Вторая часть					
Zc2i	2,2	0,75	1,45	1,2325	Операции №200-270
Zк2i	2,175	0,675	1,5	1,305	

Как видно, расчетная точность заготовки после выполнения первой части технологического процесса остается невысокой. Поля рассеивания точек профиля спинки и корыта лопатки находятся в пределах 2 мм. Удаляемые припуски в процессе выполнения черновой обработки колеблются в партии обрабатываемых заготовок в пределах более 4,5 мм. Максимальные величины удаляемых припусков при обработке составляют значительные величины.

Необходимо отметить также, что на фактические величины удаляемых припусков будут оказывать влияние технологические особенности изготовления исходной заготовки. Штамповочные уклоны, возможные смещения штампов по линии разъема значительно увеличивают фактические припуски в первой части технологического процесса. В отдельных случаях эти припуски достигают 20 мм и более. Удаление таких слоев металла при механической обработке связано с необходимостью выполнения нескольких проходов.

В связи с вышеизложенным можно отметить, что применяемая исходная заготовка является причиной высокой трудоемкости процесса изготовления данных лопаток. *Создавая исходную заготовку с формой, близкой по форме готовой детали, и повышая точность ее параметров можно сократить или исключить первую часть технологического*

процесса. Эта задача решается на основании экономической целесообразности и возможностей существующего производства.

Во второй части технологического процесса (операции №200-305) обеспечивается формирование качественных основных показателей лопатки. На этом этапе выполняются геометрические параметры пера и его положение относительно замка лопатки. Это формирование происходит на операциях №265-270, а также при ленточном шлифовании профиля пера лопатки.

Произведем анализ точности расположения пера лопатки относительно замка, а также определим значения удаляемых припусков во второй части технологического процесса.

В соответствии с комплексной схемой общие уравнения размерных цепей (рис. 3.20), определяющих возможные толщины пера лопатки в сечениях, близких к замку $П_н$ и к вершине $П_к$ лопатки, имеют вид:

$$П_к + a_{15} - a_{12} + a_{14} = 0;$$

$$П_н + a'_{15} - a'_{13} + a'_{14} = 0''.$$

Эти уравнения позволяют учитывать особенности установки заготовок лопаток в технологических системах при выполнении чистовой обработки пера на операциях №265 – 270.

Рассмотрим уравнения замыкающих звеньев представленных размерных цепей и определим поля рассеивания ω возможных положений оси пера относительно оси замка лопатки.

Для $П_к$ имеем

$$П_к = a_{12} - a_{15} - a_{14};$$

$$\omega_{П_к} = \omega_{a_{12}} + \omega_{a_{15}} + \omega_{a_{14}} = 0{,}05 + 0{,}3 + 0{,}3 = 0{,}65 \text{ мм}.$$

Для $П_н$, имеем:

$$П_н = a'_{13} - a'_{15} - a'_{14};$$

$$\omega_{П_н} = \omega_{a'_{13}} + \omega_{a'_{15}} + \omega_{a'_{14}}\ \omega' = 0{,}1 + 0{,}3 + 0{,}3 = 0{,}7 \text{ мм}.$$

Так как

$$\omega_{см} = 0{,}5\omega;$$

$$\omega_{П_{к.см}} = 0{,}325 \text{ мм, а } \omega_{П_{н.см}} = 0{,}35 \text{ мм}.$$

Припуски, удаляемые на операциях №265-270 и №305 определим из уравнений размерных цепей:

для операции №265:

$$z_{c2i} - a_{14} + a_{11} \pm a_{10} - a_8 = 0;$$

$$z_{c2i} = a_{14} - a_{11} \pm a_{10} + a_8;$$

$$z_{c2imax} = 35{,}5 - 37{,}45 + 0{,}25 + 3{,}3 = 1{,}5 \text{ мм};$$

$$z_{c2imin} = 35{,}2 - 37{,}5 - 0{,}25 + 2{,}9 = 0{,}35 \text{ мм};$$

$$\omega_{z_{c2i}} = z_{2cimax} - z_{2cimin} = 1{,}15 \text{ мм};$$

для операции №270:

$$z_{к2i} - a_9 \pm a_{10} - a_{11} + a_{12} - a_{15} = 0;$$

$$z_{2i} = a_9 \pm a_{10} + a_{11} - a_{12} + a_{15};$$

$$z_{к2imax} = 10{,}4 + 0{,}25 + 37{,}5 - 74{,}975 + 28{,}5 = 1{,}675 \text{ мм};$$

$$z_{к2imin} = 10 - 0{,}25 + 37{,}45 - 75{,}025 + 28{,}2 = 0{,}375 \text{ мм};$$

$$\omega_{z_{к2i}} = z_{2imax} - z_{2imin} = 1{,}3 \text{ мм};$$

для операции №305

$$a_{14} + z_{c*2i} - a_{16} = 0;\ a_{15} - a_{17} + z_{к*2i} = 0.$$

Тогда

$$z_{c*2i} = a_{16} - a_{14} \quad \text{и} \quad z_{к*2i} = a_{17} - a_{15}.$$

Припуск со стороны спинки лопатки равен

$$z_{c*2imax} = a_{16max} - a_{14min} = 0{,}6 \text{ мм};$$

$$z_{c*2imin} = a_{16min} - a_{14max} = -\,0{,}2 \text{ мм}.$$

Соответственно припуск со стороны корыта лопатки имеет следующие значения:

$$z_{к*2imax} = 0{,}6;\ z_{к*2imin} = -\,0{,}2.$$

В третьей части технологического процесса заготовка подвергается отделочной обработке. При полировании пера лопатки обеспечивается повышение шероховатости поверхностей и припуск, удаляемый с образующих поверхностей пера, практически не изменяет положения профиля относительно номинального, так как осуществляется копиро-

вание положения, полученного при чистовой обработке пера. Исходя из этого суммарная погрешность расположения профиля пера лопатки относительно замка остается практически неизменной после проведения второй части технологического процесса.

В табл. 3.12 представлены расчетные значения точности лопатки на второй части технологического процесса и даны значения ожидаемых припусков в этой части технологического процесса.

Таблица 3.12. - Расчетные значения точности лопатки на второй части технологического процесса

Параметр	Max	Min	ω_i	Операции
$\omega_{П_{к.см.}}$			± 0,350	№ 265-270
$\omega_{П_{н.см.}}$			± 0,350	
z_{c2i}	1,500	0,350	1,150	№265
$z_{к2i}$	1,675	0,375	1,300	№270
z_{c*2i}	0,600	-0,200		№305
$z_{к*2i}$	0,600	-0,200		

Приведенные значения показывают, что расположение профиля пера лопатки относительно замка, заданное в чертеже (см. рис. 3.15), обеспечивается во второй части технологического процесса. Те изменения, которые произойдут при дальнейшей обработке шлифованием (операция №305), полированием (операция №425) и в процессе проведения стабилизирующего отжига (операция №450), не должны превышать заданное допустимое смещение 0,5 мм.

Расчетные величины припуска, удаляемые при чистовом фрезеровании пера лопатки колеблются от 1,675 мм. до 0,350 мм.

Припуск, удаляемый при шлифовании, изменяется от 0,6 до 0,2 мм.

Операционные размеры a_{14} и a_{16}, а также размеры a_{15} и a_{17} имеют такие числовые значения, которые позволяют заканчивать обработку шлифованием на операции №305 при достижении необходимой шероховатости поверхности пера, так как точность размеров пера лопатки и

его расположение относительно замка уже выполнены в процессе чистового фрезерования. Это позволяет уменьшать трудоемкие работы, связанные со шлифованием до минимума.

При этом величина физического положения плоскости симметрии пера лопатки относительно замка, заданная в чертеже (п. 6, с. 110) ± 0,5 мм определяется суммой полей рассеяния операционных размеров a'_{13}, a_{16}, a_{17}, a_{18} и a_{19}, т.е.

$$\omega_{A\Sigma} = \pm 0{,}5(\omega_{a'_{15}} + \omega_{a_{16}} + \omega_{a_{17}} + \omega_{a_{18}} + \omega_{a_{19}}) =$$
$$\pm 0{,}025 \pm 0{,}25 \pm 0{,}25 \pm 0{,}025 \pm 0{,}025 = \pm 0{,}5625.$$

Определение вероятностной суммы $\omega_{A\Sigma B}$ при таких отношениях составляющих полей рассеяния производственных погрешностей (0,05 и 0,5 мм) не имеет смысла, так как коэффициент теоретико-вероятностного суммирования в этом случае будет равен $\cong 1$.

Тогда коэффициент точности процесса $K > 1$. В этом случае, для избегания брака на операциях №305 и №405 необходимо контролировать в процессе обработки пера лопатки фактическое смещение профиля относительно замка с помощью специального контрольно– измерительного прибора, а по мере необходимости принимать конкретное технологическое решение.

ГЛАВА 4
ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДИСКОВ ГТД

4.1. КОНСТРУКЦИЯ, ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ И МАТЕРИАЛЫ

Диски являются наиболее ответственными элементами конструкции роторной части ГТД. Начиная с входа в проточную часть ГТД и при выходе газов из турбины, действуют силовые и температурные нагрузки, которые воспринимает вращающийся ротор (рисунок 1.1). В дисках компрессора и турбины закреплены лопатки, которые обеспечивают постепенное сжатие воздуха в компрессоре низкого давления (КНД), среднего давления (КСД) и высокого давления (КВД). Затем смесь воздуха и топлива из камеры сгорания (КС) подается на турбину. Поток газов, имеющих высокую температуру (Тг.max.=1600К), поступая на лопатки турбины, создает вращение роторной части ГТД. Реактивная сила, возникающая в роторе, обеспечивает работу изделия.

Диски турбины ГТД работают при очень высоких силовых и температурных нагрузках. Напряжения, возникающие в дисках, достигают 500 МПа. Температура газов на входе в турбину Тг кр = 1300 К и $Т_{г.\ мах}$ = 1600 К, поэтому диски турбин в основном изготавливают из хромоникелевых сплавов с высоким содержанием никеля (62 – 73 %).

Периферийная часть диска (обод) воспринимает действие высоких температур. Перепад температур по радиусу диска достигает 400К, что вызывает большие температурные напряжения в материале, приводящие к появлению трещин и в отдельных случаях к разрушению диска. Такие условия работы дисков при значительных частотах вращения требуют высокой сбалансированности элементов роторной части и отсутствия значительных перетеканий газов в лабиринтных уплотнениях ГТД.

Диски турбины ГТД представляют собой равнопрочную конструкцию, учитывающую воздействие осевых, центробежных и температурных напряжений и неравномерность их воздействия по всему профилю (рис. 4.1).

Диск турбины первой ступени двухконтурного ГТД изготавливают из хромоникелевого сплава ЭИ698ПД (ХН62БМКТЮ-ПД) получаемого методом вакуумного дугового переплава. Этот сплав весьма трудно подвергается механической обработке, но благодаря комплексу хороших физико-механических свойств используется для дисков турбины ГТД:

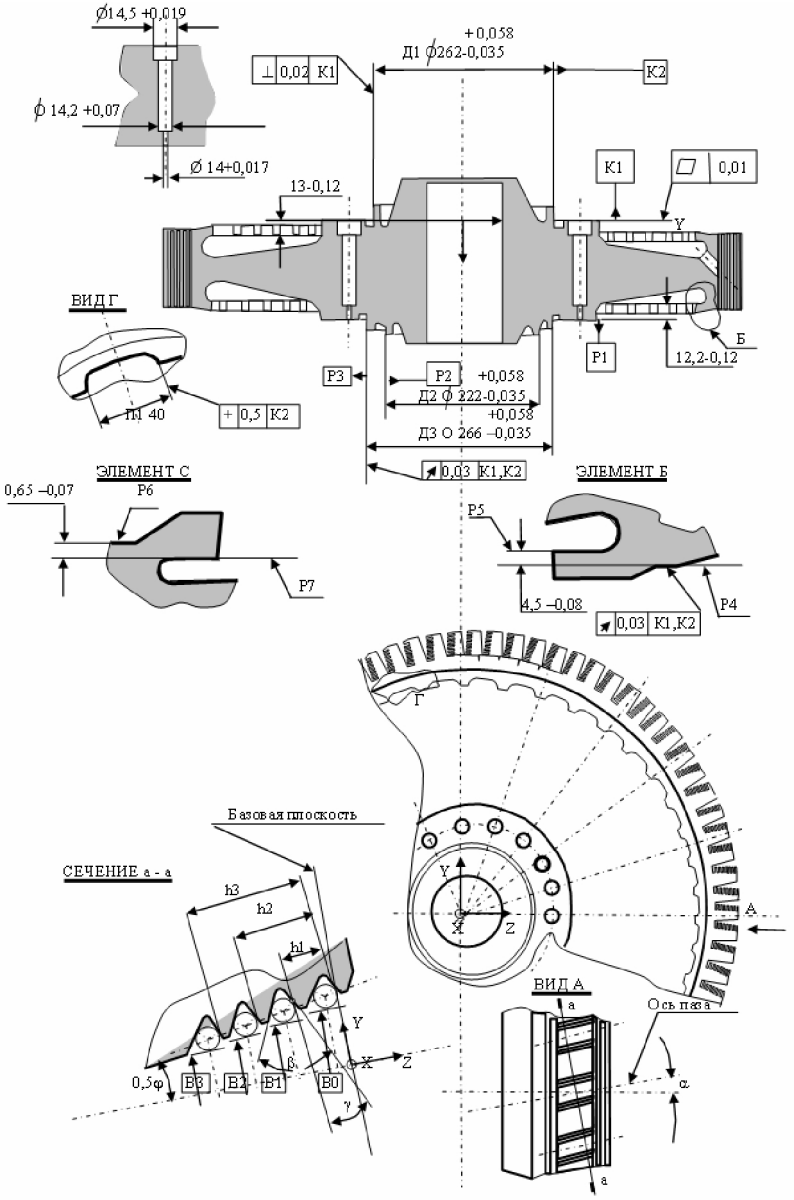


Рис. 4.1. Диск турбины первой ступени

Механические свойства сплава:

– твердость НВ 302...375 единиц,

– временное сопротивление разрыву $\sigma_в$ = 1150 Мпа (117 кг/мм^2),

– относительное удлинение δ_s = 13%;

– относительное сужение ψ = 14%;

– деформируемость при температуре 1160…1000°С.

Химический состав сплава, %:

– углерод – 0,03…0,07%,

– кремний – 0,5%,

– марганец – 0,4%,

– сера – 0,07%,

– фосфор – 0,015%,

– хром – 13,0…16,0%,

– никель – 70% (основа),

– титан – 2,32…2,75%,

– алюминий – 2,8…3,2%,

– ниобий – 1,9…2,2%,

– железо – 2%,

– свинец – 0,01%,

– бор – 0,005%,

– церий – 0,005%.

Содержание сурьмы, олова, висмута, мышьяка – не более 1 балла по шкале спектрального анализа. Благодаря добавлению 0,005% бора сплав существенно превосходит по жаростойкости другие сплавы.

Этот сплав отличается хорошим сочетанием прочности и пластичности, а так же высокой коррозионной стойкостью.

Диск турбины первой ступени имеет следующие основные элементы:

– усиленную массивную ступицу;

– центрирующие пояски для ориентирования диска в роторе;

– равнопрочное, конусообразное полотно диска;

– обод диска, в котором расположены пазы для установки и закрепления лопаток;

– элементы центрирования и закрепления дифлекторных и лабиринтных колец;

– высокоточные отверстия для установки и крепления дисков к валам с помощью призонных болтов.

Основными конструкторскими поверхностями диска являются поверхности К1 и К2, которые определяют положение диска относитель-

но передней опоры ротора. Поверхности Р1 и Р2 служат для соединения диска с элементом вала для задней опоры ротора ГТД.

Точность выполнения этих поверхностей и точность расположения их относительно друг друга обеспечивается в пределах IT5…IT6. Плоскостность торцевой поверхности $К_1$ выполняется с точностью до 0,01 мм, а шероховатость этой поверхности до R_a = 2,5 мкм.

Поверхность $К_1$ создает плотное прилегание диска к торцовой поверхности вала в процессе сборки ротора и определяет координатную плоскость *ZOY*.

Центрирование диска выполняется по поверхности $К_2$. Она создает координатную ось *0X* детали, обеспечивает при сборке ротора беззазорное соединение по поверхности $Д1$, выполняется по IT5. Посадка 262 H6/k5. Эта обеспечивает возможные предельные значения натягов от – 0,003 мм до – 0,058 мм. Поверхность $Д_2$ диаметром 266 – 0,035 мм и прилегающий торец $Р_1$ обеспечивают соединение диска с валом для задней опоры.

Представленные поверхности $К_1$, $К_2$ создают координатную систему *XYZ* диска ГТД. Относительно координатной системы *XYZ* в диске турбины расположены основные рабочие элементы:

– поверхности елочного замка диска *I*;

– поверхности для центрирования и закрепления колец лабиринтных уплотнений и дефлекторов *II*;

– отверстия для соединения диска с валом *III*.

Ось елочного паза (вид *А*) повернута к оси диска на угол $\alpha = 8^\circ$. Допуск на данный угол составляет 10′. Через первый паз замка проходит базовая плоскость (сечение а-а), которая определяет координатную систему установки лопатки в диске. Для создания точного положения лопаток в пазах диска базовая плоскость, начиная с нулевого паза диска, контролируется. Допустимое отклонение положения фактической базовой плоскости от номинального положения не должно превышать 0,03 мм на длине 100 мм.

Профиль елочного замка диска получают методом протягивания. Точность геометрических параметров елочного замка обеспечивается в следующих пределах:

– допуск на шаг зубьев паза (размеры h_1, h_2, ...h_n) 0,02 мм;

– допуск на угол профиля паза $\beta = 10'$;

– допуск на положение паза относительно оси (угол $\gamma = 10'$;

– допуск на ширину паза (размеры B_0, B_1, ...B_n) 0,08 мм.

В процессе установки лопаток в диск осуществляется селективная сборка. При этом пазы диска разбиваются на три группы по размерам, мм:

1) 14,19 + 0,04;
2) 14,23 + 0,04;
3) 14,27 + 0,04.

Перед установкой лопаток в диск каждая лопатка проверяется на наличие качки в замке, которая на полной длине лопатки должна составлять 0,3 мм.

Постановка лабиринтных и дифлекторных колец производится по основным $К_1$ и $Р_1$ и дополнительным поверхностям $Р_4$, $Р_5$ с правой стороны диска (элемент *Б*) и $Р_6$, $Р_7$ с левой стороны диска (элемент С). В процессе установки выступы колец вводятся в пазы $П_1$ (вид Г), а за счет поворота кольца создают натяг – 0,08 мм в зоне размера 4,5 для правой стороны и 0,07 мм в зоне размера 0,65 для левой стороны. Такая сборка лабиринтных колец обеспечивает их неподвижное соединение с диском.

Отверстия для крепления дисков с помощью призонных болтов выполняются в пределах IT5 (14+0,017 мм, 14,5+0,019 мм). Свободные поверхности этого отверстия выполняется в пределах IT10 (14,2+0,07 мм). Расположение отверстий относительно друг друга и положение их относительно конструкторских поверхностей $К_1$ и $К_2$ выполняется в пределах допуска 0,04 мм.

Допустимое смещение свободных поверхностей до 0,2 мм.

Необходимо отметить, что диски компрессоров и турбины, работая при значительных частотах вращения, должны иметь минимальные смещения вращающихся неуравновешенных масс. Для уменьшения «скрытой неуравновешенности» элементов роторов необходимо уменьшать источники, порождающие эту неуравновешенность в процессе изготовления и сборки. В связи с этим точность расположения поверхностей роторной части двигателя, включая свободные поверхности, повышенная. Так, допуск на смещение свободных поверхностей контура диска должен быть не более 0,06 мм.

Поверхности диска воспринимают значительные напряжения при эксплуатации. С целью улучшения качественных показателей поверхностей их подвергают абразивно-жидкостной обработке, а на профиль рабочей замковой части диска воздействуют микрошариками для создания в поверхностном слое сжимающих напряжений.

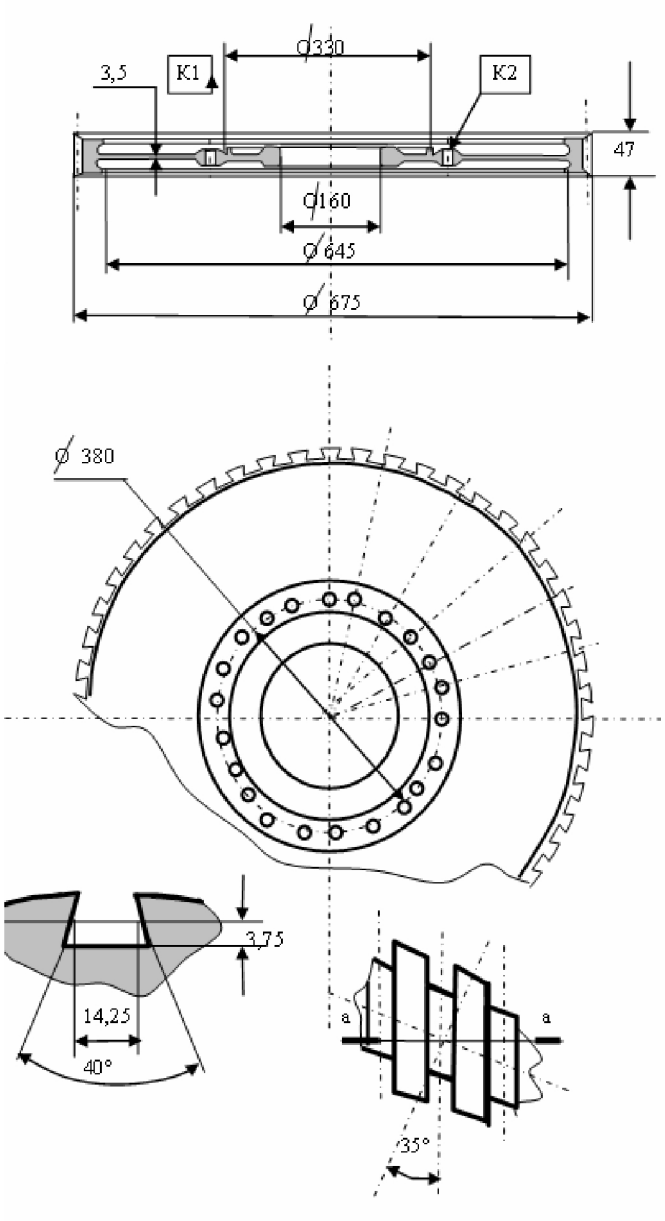


Рис. 4.2. Диск пятой ступени компрессора

На рис. 4.2 представлен диск пятой ступени, который расположен в средней части ротора осевого компрессора.

Диски компрессора имеют следующие основные элементы:

– центрирующий поясок K_1 и торец K_2 для ориентирования диска в роторе компрессора;

– наружный обод (ширина 47 мм), служащий для установки и закрепления лопаток;

– тонкостенное полотно диска (толщина полотна диска 3,5 мм);

– усиленный поясок в средней части диска (толщина пояска 8 мм) с 30 отверстиями диаметром 10 мм для закрепления диска в роторе компрессора смешанного вида [1].

По наружному диаметру диска под углом 35° к оси расположены 65 пазов трапецеидальной формы (сечение а–а). Эти пазы обеспечивают ориентирование лопаток и их закрепление в осевом и радиальном направлениях.

Конструкторскими поверхностями являются центрирующий поясок диаметром 330 мм (поверхность K_1) и прилегающий торец K_2. Они выполняются с высокой точностью. Для изготовления таких дисков используется титановый сплав ВТ-9, ВТ-20 и др.

Преимуществом титановых сплавов являются высокие механические свойства и корозионная стойкость при малой плотности материала. Эти сплавы обладают термической стабильностью и не охрупчиваются при длительной работе под нагрузкой в условиях нагрева 400…500ºС. Сплав ВТ-9 является жаропрочным.

Механические свойства сплава ВТ-9:

– твердость 269–363 НВ;

– временное сопротивления разрыву $\sigma_в$ = 1029…1225 Мпа (105…125 кгс/мм^2).

– относительное удлинение δs = 9%,

– относительное сужение ψ = 25%.

Химический состав сплава ВТ-9,%:

– алюминий – 5,8…7,0 %,

– молибден – 2,8…3,8 %,

– цирконий – 0,8…2,0 %,

– кремний – 0,2…3,5 %.

Основой сплава является титан. Примесей в данном сплаве не более 0,865 %.

Обрабатываемость материала по отношению к стали 45 невысокая (коэффициент обрабатываемости 0,2).

При работе ГТД в дисках компрессора возникают значительные напряжения от центробежных сил, массы самих дисков и массы лопаток, установленных на ободе. В дисках компрессора действуют также температурные напряжения, вызываемые неравномерным нагревом диска по радиусу и толщине. Напряжения от сил газов вызывают изгиб дисков.

Диски компрессора относятся к деталям, имеющим ажурные, тонкостенные, высоконагруженные элементы.

4.2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИСКОВ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ТУРБИНЫ

На основании представленной конструкции диска, требований к ним при эксплуатации, а также в связи с особенностями совершенствования технологических процессов производства деталей авиационных двигателей можно отметить следующие особенности дисков первой ступени турбины ГТД:

– высокие требования к качеству материала (используется хромоникелиевый сплав ХН62БМКТЮ – ПД и др.);

– используемый материал трудно обрабатывается методами лезвийной обработки (коэффициент обрабатываемости равен 0,04);

– диски турбины имеют сложный фасонный профиль поверхностей вращения;

– профиль замков в пазах диска имеет сложную форму и высокие требования к точности поверхностей и их расположению относительно друг друга;

– высокие требования к расположению свободных поверхностей (допустимое смещение поверхностей относительно номинального положения не более 0,06 мм);

– высокие требования к качеству поверхностей и состоянию поверхностного слоя.

Перечисленные особенности дисков турбины определили основные пути получения исходной заготовки и процессы формирования качественных показателей детали в производстве:

– создание исходной заготовки первой группы контроля по ТУ1-807-175-85;

– изготовление исходной заготовки с минимальными припусками на обработку поверхностей;

– выделение части технологического процесса для предварительной обработки на высокопроизводительном оборудовании с ЧПУ;

– создание на первом этапе обработки технологических базовых поверхностей для точной установки заготовки в технологической системе и для надежного ее закрепления;

– использование турбоабразивной и абразивно-жидкостной обработки для основных поверхностей диска;

– использование метода дробеструйной обработки профиля замков в пазах диска для создания сжимающих напряжений;

– применение современных методов контроля в процессе изготовления и при окончательной сдаче дисков на сборку.

4.2.1. Маршрутная технология изготовления дисков

Изготовление дисков первой ступени турбины можно условно разделить на следующие основные этапы:

– получение исходной заготовки методом штамповки;

– предварительная обработка поверхностей диска на высокопроизводительном оборудовании;

– термическая обработка;

– получистовая обработка основных поверхностей диска;

– чистовая обработка и доводка конструкторских и рабочих поверхностей диска;

– отделочный этап обработки.

4.2.2. Получение исходной заготовки диска

Исходную заготовку получают горячим деформированием. Для этого используют кривошипные горячештамповочные прессы (КГШП) с усилиями до 110 МН (до 11000 тс). Эти прессы имеют жесткую закрытую стальную станину; жесткий кривошипно-шатунный механизм с надежным направлением шатуна.

Скорость движения ползуна к началу рабочего хода (к моменту соприкосновения верхней части штампа с обрабатываемой заготовкой) у КГШП составляет 0,5…0,8 м/с, что в 10 раз меньше скорости бабы молота в момент удара [32,33]. В связи с этим пресс характеризуется неударным характером работы.

КГШП имеет жесткий фиксированный ход, обеспечивающий совершенно определенное нижнее положение ползуна. Если штамп является закрытым, то для штамповки требуются заготовки точного объема, равного объему полости штампа, в противном случае поковка получается большей по высоте. Увеличение высоты потребует соответствующего увеличения упругой деформации системы штампа КГШП.

При конструировании поковки, штампуемой на прессе, радиусы закругления, перемычки под прошивку и другие элементы принимаются такие же, как для молотовых поковок. Существенное отличие имеется только в величине припусков, допусков и штамповочных уклонов. Указанные преимущества позволяют уменьшить припуски на механическую обработку и допуски на размеры по сравнению с молотовыми поковками на 25…30%.

На рис. 4.3 представлен эскиз заготовки диска первой ступени турбины, полученной на КГШП. Допуски на диаметральные размеры заготовки выполняются в пределах от 3,3…2,0 мм, допуски на линейные размеры – в пределах от 0,5…1,9 мм. Свободные штамповочные уклоны (угол α) обеспечиваются в пределах 7°. Радиусы переходов плоских или цилиндрических поверхностей в поверхности со штамповочными уклонами $R = 5 \pm 0{,}5$ мм.

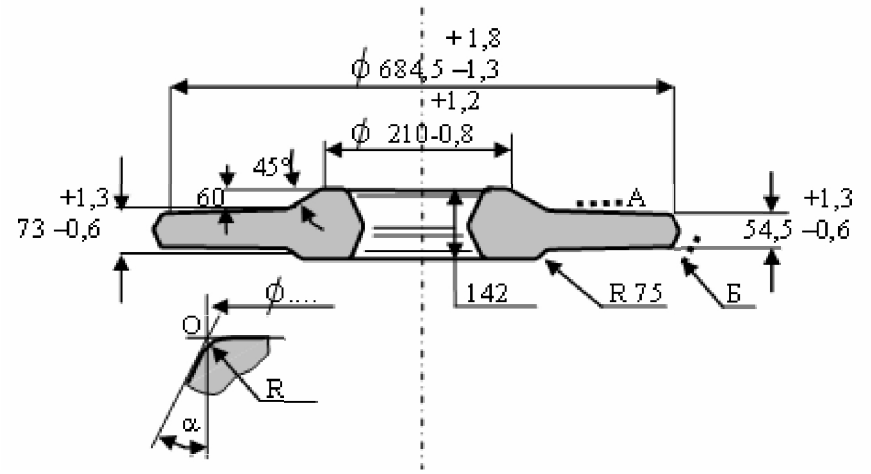


Рис. 4.3. Эскиз заготовки диска первой ступени турбины

Геометрические параметры исходной заготовки задаются до точек пересечения (точка 0) плоских или цилиндрических поверхностей штамповочных уклонов. Допустимые отклонения от номинальных значений при этом задаются в сторону как увеличения размера, так и возможного его уменьшения. Исполнительные размеры гравюры штампов при этом будут выполняться по номинальным значениям данных размеров с допустимыми отклонениями на порядок точнее, чем они задаются для исходной заготовки. Такой способ назначения размеров и допустимых отклонений для исходной заготовки, а также назначение исполнительных размеров гравюр штампов учитывает природу формирования производственных погрешностей во времени.

Нижнее отклонение для заданного размера предусматривает возможность не заполнения полости штампа и усадку заготовки при остывании. Верхнее отклонение позволяет учитывать возможные изменения размеров при износе полости штампа во времени.

На рис. 4.3. показаны исходные базовые технологические поверхности А и Б, на которых в процессе изготовления исходной заготовки не допускаются повреждения и различные дефекты.

Коробление заготовки должно быть не более 1 мм. Отклонение от параллельности торцов заготовки также должно быть не более 1 мм. Штамповочный уклон по наружной поверхности исходя из технологических соображений может быть увеличен до 15° и более. Это выполняется с целью сохранения качественных показателей материала в зоне обода диска от выгорания легирующих компонентов в процессе горячей штамповки, а также для возможности вырезки технологического образца для проверки механических свойств заготовки в соответствии с требованиями первой группы контроля. Повышенный штамповочный уклон создает также удобства для центрирования и закрепления заготовки на первой операции при механической обработке.

С учетом сложность формы диска турбины и условий выполнения горячей штамповки исходная заготовка недостаточно приближена к форме готовой детали. В связи с этим в отдельных местах заготовки возникают значительные напуски материала, которые увеличивают трудоемкость изготовления дисков. Для снижения трудоемкости механической обработки и создания исходной заготовки дисков ГТД, приближенных к форме готовой детали, методом горячей штамповки на КГШП, можно, оценив экономичность вариантов, применять различные приемы по оптимизации процесса, например: обеспечивать стабилизацию тепла заготовки, более равномерную осадку на каждом из эта-

пов штамповки, использовать смазочные материалы, содержащие стекло, создавать степень деформации при осадке не более 20…25% и т.д. [32,33].

Получение исходной заготовки штамповкой из жидкого металла с использованием гидравлических прессов и штампов с ручьями закрытого вида является перспективным направлением совершенствования исходных заготовок для дисков. В этом случае, подвергаемая давлению до момента полного затвердевания металла, геометрическая форма заготовки может быть близка к форме готовой детали. Этот процесс и процесс формирования заготовок при температурах, соответствующих сверхпластичности материала, дают возможность совершенствования формы и размеров исходной заготовки дисков.

Применение современных методов требует точного дозирования металла и непрерывного сжатия его во время кристаллизации. При этом усилия пресса составляют 500 МН/м^2, (5 тс/см^2). В этом случае металл получается более высокого качества, чем при отливке.

4.2.3. Механическая обработка дисков

Исходные заготовки дисков, полученные методом КГШП, имеют значительные припуски и напуски по всему контуру. Это объясняется несовершенством существующих средств производства заготовок, экономической целесообразностью затрат, связанных с процессом создания высокоточных заготовок, и другими причинами. Совершенство процессов получения исходных заготовок является важной проблемой при создании современных ГТД.

Ниже рассмотрен технологический процесс механической обработки заготовок диска первой ступени турбины, который в настоящее время имеет значительное применение в производстве ГТД и ориентирован на использование исходной заготовки, полученной на КГШП.

Исходная заготовка в процессе механической обработки приобретает окончательную форму. Здесь создаются качественные показатели поверхностей детали, обеспечивается необходимое состояние материала и диск подготавливается к сборке ротора ГТД.

Заданные чертежные условия определяют последовательность обработки поверхностей диска, совмещение отдельных операций, использование различного металлорежущего оборудования, способов базирования заготовки и другие приемы.

Процесс механической обработки дисков первой ступени турбины можно условно разделить на четыре основные части.

В первой части технологического процесса (операции №10-65) обеспечивается формирование профиля контура диска на токарном оборудовании и осуществляется подготовка базовых установочных поверхностей заготовки. Эту часть технологического процесса можно разделить на три основных этапа:

1) операции №10-20, предусматривает предварительную токарную обработку контура заготовки и подготовку базовых установочных технологических поверхностей.

2) операции №25-35, определяет получистовую токарную обработку контура заготовки и обновление базовых установочных поверхностей.

3) операции №40-65, предусматривает чистовую токарную обработку контура заготовки и создание базовых поверхностей для обработки основных элементов диска на последующих операциях технологического процесса.

В этой части технологического процесса предусматривается снятие основного припуска и создание базовых установочных поверхностей. Подготовленные базовые поверхности определяют положение заготовок в технологических системах при дальнейшей обработке.

Во второй части технологического процесса (операции №70-160) выполняется обработка основных элементов диска. В этих операциях технологического процесса производится формирование пазов для лопаток и установки дифлекторных колец, обработка отверстий для ориентирования лопаток и создание других элементов диска турбины.

В третьей части технологического процесса (операции №165-185) выполняется окончательная обработка конструкторских поверхностей диска турбины.

В четвертой части технологического процесса производится окончательная доводка наиболее ответственных элементов диска турбины первой ступени.

План механической обработки исходной заготовки имеет следующую последовательность:

Первая часть.

№5. Заготовка (штамповка в закрытых штампах на КГШП).

№10. Предварительная токарная обработка первой стороны диска.

№15. Предварительная токарная обработка второй стороны диска.

№20. Токарная обработка обода диска.

№25. Получистовая токарная обработка первой стороны диска.

№30. Получистовая токарная обработка второй стороны диска.

№35. Получистовая обработка обода диска.

№40. Чистовая токарная обработка первой стороны диска.

№45. Чистовая токарная обработка второй стороны диска.

№50. Промывка.

№55-60. Контрольная.

№65. Обработка отверстий в ступице диска.

Вторая часть.

№70-80. Фрезерование пазов и скосов на боковых поверхностях диска.

№85. Слесарная обработка диска.

№90-120. Обработка образцов и пазов под лопатки в ободе диска; слесарная обработка и контроль качества.

№125-145. Обработка отверстий малого диаметра для фиксации лопаток в диске, подачи воздуха для охлаждения и формирование других элементов

№150-160. Полирование, термическая обработка.

Третья часть.

№ 165. Абразивно-жидкостная обработка диска.

№170-180. Окончательная токарная обработка основных конструкторских и рабочих поверхностей.

№ 185. Окончательная обработка отверстий под призонные болты.

Четвертая часть.

№190-205.Абразивно-полировальная обработки обработка диска.

№ 210. Люминесцентный контроль.

№215-220. Упрочнение основных поверхностей диска.

№225. Окончательный контроль.

В этом процессе можно выделить отдельные операции, на которых формируются качественные окончательные характеристики детали. Выполнение этих характеристик зависит от технологических показателей производства, от правильности выбора и назначения режимов обработки и соблюдения технологической дисциплины.

Рассмотрим в технологическом процессе изготовления дисков первой ступени турбины отдельные фрагменты.

Первая часть технологического процесса механической обработки заготовок (рис. 4.4) проводится в три этапа и начинается с предварительного грубого формирования основных поверхностей дисков.

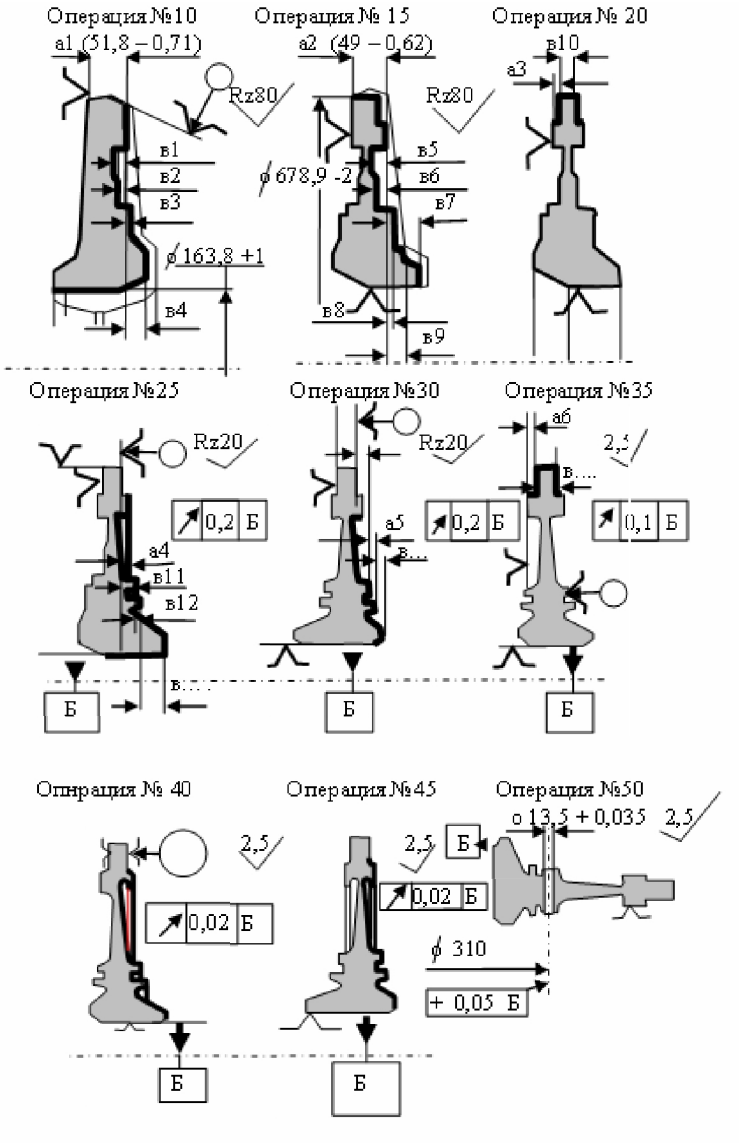


Рис. 4.4. Первая часть технологического процесса механической обработки диска первой ступени турбины

Диск первой ступени турбины, представленный на рис. 4.1, имеет сложнофасонный профиль контура с наличием большого количества выемок, углублений, торцевых пазов и других конструктивных элементов. Это требует оптимального разделения припусков и напусков исходной заготовки по операциям технологического процесса.

На операциях технологического процесса (операции 10-15) используются металлорежущие станки высокой жесткости и мощности. На этих операциях удаляется основной припуск и напуск. Контур заготовки приобретает форму, близкую к форме готовой детали.

На этих операциях обеспечивается равномерное распределение припуска на дальнейшую обработку контура диска. Припуски на последующие операции составляют 2…3 мм. Шероховатость обрабатываемых поверхностей выполняется не ниже *Rz*80. Мелкие канавки, уступы и выемки на данных операциях не обрабатываются.

На операции №20 создаются базовые установочные поверхности, которые позволяют надежно с достаточной точностью закрепить заготовку в технологической системе на последующих операциях технологического процесса. При выполнении этих операций используются карусельные токарные станки как обычные, так и с ЧПУ моделей 1508, 6751, DFM-30 и др.

Режущий инструмент имеет твердосплавные пластины из высокопрочных материалов (ВК8, ВК10, ВК10ХОМ и другие).

Применяемые материалы режущих инструментов обладают хорошей размерной стойкостью, что позволяет активно использовать на этих операциях автоматический метод достижения точности на настроенном оборудовании.

Грубая предварительная обработка цилиндрических и торцевых поверхностей диска на операциях № 10-15 осуществляется при скорости резания v=10…12 м/мин, продольная подача при этом составляет S_o = 0,21 мм/об. Для выполнения торцевых канавок на этих операциях подача уменьшается до So = 0,1 мм/об. Эти условия обработки обеспечивают заданные показатели качества на данном этапе технологического процесса.

Для подрезки торцов и проточки наружных цилиндрических поверхностей используются проходные отогнутые резцы со следующими основными геометрическими параметрами: $\varphi = 60°$; $\varphi_1 = 45°$; $\gamma = 10°$; $\alpha = 8°$; $\lambda = 2°$. Радиус у вершины резца составляет r = 1 мм сечение державки резца Н · В = 25 · 16 мм, длина L = 50 мм.

Для растачивания отверстий используются прямые расточные резцы со следующими основными параметрами:φ = 45°; φ = 45°; γ = 10°; α = 10°; λ = 2°. Радиус у вершины резца составляет r = 1 мм, сечение державки Н · В = 25 · 16 мм, длина L = 140 мм. Для проточки торцевых канавок используются прямые усиленные канавочные резцы со следующими геометрическими параметрами: φ = 90°; φ_1 = 2°; γ = 7°; α = 8°; λ = 2°. Радиус переходов r = 1 мм. Сечение державки равно: Н · В = 25 · 16 мм, длина L = 50 мм. Ширина торцевых канавочных резцов принимается в зависимости от размеров обрабатываемого элемента диска.

После выполнения предварительной обработки поверхностей диска на операциях №10–15 и подготовки обода диска на операции №20 в качестве промежуточной технологической базы производится получистовая токарная обработка контура полотна диска (операции №25–35). На этих операциях обеспечивается шероховатость поверхности до Rz = 40 мкм, а точность расположения контуров полотна диска относительно друг друга выполняется с биением не более 0,2 мм.

Необходимо отметить, что при простановке операционных линейных размеров как для предварительной обработки (операции №10-20), так и для получистовой обработки (операции №25-45) используется правило связи внутрикомплексных размеров ($в_1$, $в_2$, $в_3$, ..., $в_{10}$ ... и т.д.) с базовыми установочными поверхностями заготовок одним операционным линейным размером. Для операции №10 это размер является размер a_1 = (51,8-0,71) мм, а для операции №15 a_2 = 49-0,62 мм и т.д.

Подобная простановка размеров позволяет обеспечивать качественную обработку комплекса поверхностей заготовки на настроенном станке в автоматическом режиме, выполнение размеров не обеспечивает выполнение размеров $в_1$, $в_2$, $в_3$,...$в_{10}$ и т.д. по первой технологической схеме [11]. В этом случае погрешности, которые возникают в процессе обработки, определяются только применяемым методом. Размеры a_1, a_2, a_3,....a_n,... и т.д. обеспечиваются по второй технологической схеме [11], составляющие погрешности которых определяются как применяемым методом обработки, так и погрешностью установки заготовки в технологической системе.

С целью уменьшения этих составляющих погрешностей производится подготовка промежуточных и основных базовых технологических поверхностей с высокой точностью (см. операции №20, 35 и др.). Подобная схема простановки операционных размеров осуществляется также для векторных составляющих, которые определяются техниче-

скими требованиями для ориентирования заготовки в технологической системе. Так, проверка биения в пределах от 0…0,02 мм на операциях №40 и 45 обеспечивает точное ориентирование контура левой и правой части полотна диска турбины относительно как друг друга, так и базового установочного отверстия. Этот показатель точности непосредственно влияет на качественные выходные характеристики ГТД, так как он определяет неуравновешенность масс элементов диска, а, следовательно, возможную «скрытую неуравновешенность» ротора турбины.

При нарушении правила простановки операционных размеров a_1, a_2, a_3,...a_i и т.д., когда не обеспечивается непосредственная связь обрабатываемой поверхности с установочной, может иметь место третья или четвертая технологическая схемы [11]. В этом случае погрешности базирования Δб, погрешности установки Δу и остаточная погрешность метода обработки Δо часто не позволяют выполнить заданные операционные размеры на настроенном станке в автоматическом режиме.

Тогда для выполнения операционных размеров используется комбинированный метод достижения точности. Подобный случай простановки операционных размеров (см. рис. 4.4) дан на операциях получистовой обработки полотна диска (операции № 25, 30), а также на чистовых операциях № 40 и 45 (размерные связи не показаны). Такая простановка размеров принята исходя из удобства контроля размеров на станке в процессе наладки и обработки.

Контроль положения внутрикомплексных размеров осуществляется относительно «открытого» и удобного для проведения измерения торца диска, по которому осуществляется закрепление заготовки в технологической системе. Такой способ простановки операционных размеров требует при обработке применения метода достижения заданной точности пробными проходами и не позволяет выполнить эти показатели точности в автоматическом режиме на настроенном станке. Это снижает производительность труда на операции, коэффициент использования оборудования и требует проведения контроля качества исполнения этих размеров в процессе обработки.

Необходимо отметить, что выбор способов простановки операционных размеров и их исполнение определяется состоянием производства, его культурой и экономическими показателями.

Для улучшения качества изготовления дисков роторов ГТД и повышения производительности труда на операциях технологического процесса находят применение специализированные станки с ЧПУ, которые позволяют объединять операции при обработке двух сторон диска.

В этом случае, совмещение операций №10 и 15, операций №25 и 30, и других, способствует созданию на предварительном и получистовом этапах обработки равномерного распределения припуска для последующей чистовой обработки полотна диска.

Совмещение операций №40 и 45 при чистовой обработке полотна диска улучшает качественные показатели заготовки по расположению левой и правой части контуров полотна, а следовательно, уменьшает возможную «скрытую» неуравновешенность ротора ГТД. В то же время двухсторонняя обработка дисков позволяет уменьшить влияние остаточных деформаций заготовки в процессе механической обработки. Благодаря равномерному съему металла с двух сторон диска.

Схема установки заготовки в технологической системе на данном специализированном оборудовании приведена на рисунке 4.5. Исходная заготовка ориентируется в технологической системе по штамповочным уклонам наружного контура обода диска и приводится во вращательное движение (n). Центрирующее приспособление обеспечивает совпадение оси заготовки с осями координат технологической системы (допустимое смещение в примере, составляет 0,5 мм).

Операционный размер a_1 задается до оси заготовки и контролируется в процессе изготовления относительно габаритной специальной контрольной площадки г.п. Размер a_1 связывает первую обрабатываемую поверхность диска с установочным элементом заготовки (осью заготовки). Все остальные линейные операционные размеры $в_1$, $в_2$, $в_3$,...и т.д. обеспечивают внутрикомплексную связь обрабатываемых торцевых поверхностей заготовки в этой операции.

Такая схема простановки операционных размеров позволяет обеспечивать их при обработке в автоматическом режиме на настроенном оборудовании. При этом настройка инструмента может осуществляться вне станка по эталонам с использованием резцовых блоков. Периодичность смены резцовых блоков определяется качеством режущего инструмента, состоянием оборудования, степенью охлаждения зоны обработки, величиной удаляемого припуска и другими параметрами.

Контроль состояния режущего инструмента проводится периодически по величинам качественных выходных показателей заготовок, или с помощью специальных устройств станка, которые контролируют «перегрузку» рабочих элементов оборудования или другие параметры технологической системы.

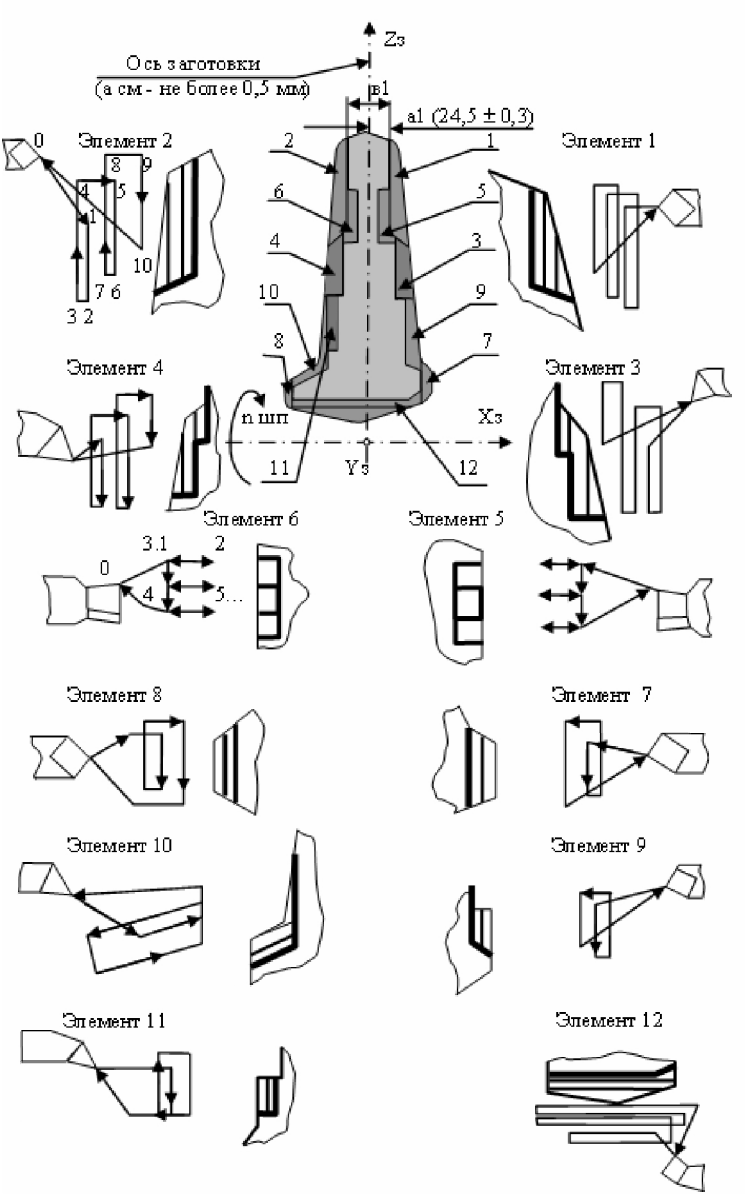


Рис. 4.5. Основные элементы при черновой обработке диска

Важным условием качественной обработки заготовок диска является оптимизация размеров удаляемого припуска и разбиение его на отдельные элементы. При выполнении этой работы производится выбор и назначение последовательности обработки различным режущим инструментом и определяется количество проходов, необходимых для удаления припуска. На основании этих данных и возможностей используемого оборудования разрабатывается рабочая технологическая карта (РТК). Эта карта определяет опорные точки перемещения режущих инструментов в технологической системе.

На рис. 4.5 показаны основные элементы припуска заготовки диска и последовательность удаления этих слоев металла в процессе обработки [9,] на совмещенной операции (№ 10 и 15, см. план обработки).

При снятии припуска (элемент *1*) заготовки выполняется три перехода. При этом используется схема переходов в виде «петли» [9]. Из нулевой точки прямой проходной резец на холостом ходу ($S_м$ = 200 мм/мин) движется в точку *1*. Из точки *1* на рабочем ходу (n = 6 об./мин, $S_о$ = 0,4 мм/об.) режущий инструмент перемещается в точку *2*. Затем с целью устранения трения инструмента по задней грани, он отводится от заготовки на 0,5 мм и перемещается в точку *3*. Из данной точки, выполняя «петлю», режущий инструмент приходит в точку *4*, а затем в точку *5*. После этого цикл обработки повторяется.

Выполнив три перехода, режущий инструмент перемещается в точку, в которой производится смена инструментального блока. Подрезной резец по схеме «петля» производит удаление припуска (элемент *3*) и обеспечивает получение ступенчатого контура заготовки.

На следующем этапе обработки (элемент *5*) усиленный канавочный резец по схеме «спуск» [9] осуществляет обработку торцевого паза в несколько переходов. Из нулевой точки резец перемещается сначала в точку *1*, а затем на рабочем ходу (n = 8 мин$^{-1}$, $S_о$ = 0,24 мм/мин) производит обработку первой торцовой канавки. Затем резец возвращается в точку *1* и перемещается вдоль образующей полотна заготовки диска в новое положение, в точку *3*. После этого выполняется обработка второй канавки на торце диска. Резец перемещается в точку *4* и т.д. При последнем проходе режущий инструмент выполняет зачистку канавки. Движение вдоль образующих поверхностей завершает обработку канавки.

После этого выполняется смена инструмента в точке *0* и процесс обработки продолжается. Удаление припуска (элементы *7* и *8*) выполняются по схеме «петля» прямым проходным резцом. При необходимо-

сти эти переходы могут быть объединены. Объединение переходов должно проводиться с учетом оптимизации времени работы резцов и их размерной стойкости. В случае необходимости в инструментальный магазин или в револьверную головку станка вводят дополнительные инструментальные блоки, которые дублируют друг друга и увеличивают, при этом суммарное время стойкости резцов.

Подобная последовательность обработки торцевых поверхностей заготовки осуществляется также с левой стороны диска (элементы *2, 4, 6, 8* и т.д.).

На специализированном станке с ЧПУ обработка левой и правой стороны заготовки диска выполняется одновременно. Это позволяет уменьшить влияние напряжений, вызванных процессом резания на геометрическую форму и состояние материала заготовки. Схема одновременной обработки заготовки с двух сторон позволяет также увеличить производительность труда на операциях технологического процесса.

Современное производство исходных заготовок пока не позволяет получить их форму, близкую к форме готовой детали. Механическая обработка поверхностей диска для таких заготовок имеет значительный объем в производстве ГТД. В связи с этим припуски на механическую обработку дисков остаются достаточно большими.

Так, при черновой обработке торцов диска величина припуска и его неравномерность у обода в партии заготовок можно определить по следующей формуле:

$$Z = a_{\text{заг.}}/2 - a_1 + a_{\text{см}},$$

где $a_{\text{заг}}$ – операционный размер толщины обода исходной заготовки (см. рис. 4.3); a_1 – операционный размер, определяющий положение обрабатываемого торца до оси заготовки (рис. 4.5); $a_{\text{см}}$ – допустимое смещение заготовки в технологической системе возникающее в процессе ее установки и закрепления.

Принимая данные в соответствии с рис. 4.3, 4.5 значения операционных размеров

$$a_{\text{заг.}} = \left(54{,}5 \pm^{1{,}3}_{0{,}6}\right) \text{ мм}; \; a_1 = (24{,}5 \pm 0{,}3) \text{ мм}; \; a_{\text{см}} = (0 \pm 0{,}5) \text{ мм},$$

имеем:

$$Z = \left(54{,}5 \pm^{1{,}3}_{0{,}6}\right) / 2 - 24{,}5 \pm 0{,}3 + 0 \pm 0{,}5 = \left(2{,}75^{+1{,}45}_{-1{,}1}\right) \text{ мм},$$

т.е. $Z_{\max} = 4{,}2$ мм; $Z_{\min} = 1{,}65$ мм.

В средней части заготовки припуск на обработку увеличивается за счет конусной формы фланца (рис. 4.3) и соответственно возрастает на величину 7...8 мм.

Таким образом, общая величина удаляемого слоя металла на черновой операции у полотна диска:

$$Z_{max} = 12{,}2 \text{ мм}; \; Z_{min} = 8{,}65 \text{ мм}.$$

При обработке торцов диска (элементы *1* и *2*) этот припуск делится на три части:

4…5 мм при первом проходе,

3…4 мм при втором проходе,

2…3 мм при третьем проходе.

Завершающим этапом обработки диска на представленной операции является расточка отверстия (элемент 12), в несколько проходов по схеме «петля»: производится удаление основного припуска и напуска, полученного в процессе штамповки исходной заготовки. На этом же этапе формируется также фаска.

При обработки исходной заготовки диска в первой части технологического процесса выполнены следующие работы:

1. проведена основная токарная обработка контура;
2. сформирован чистовой контур профиля полотна диска;
3. подготовлены технологические базовые поверхности для дальнейшей обработки заготовки.

Вторая часть технологического процесса изготовления дисков (операции №70…160) предусматривают формирование основных рабочих поверхностей. В этой части технологического процесса производятся фрезерование пазов и скосов на базовых поверхностях диска, протягивание профиля пазов для установки лопаток, обработка отверстия для фиксации лопаток в диске и др.

На рис. 4.6 представлены основные операции второй части технологического процесса. Для выполнения используются основные базовые поверхности: центральное отверстие (поверхность *Б*), торцы обода диска, а для углового ориентирования положения заготовки в технологической системе – нулевое отверстие диаметром (13,5 +0,035) мм.

На операции №70 осуществляется фрезерование пазов по всей образующей внутреннего контура (число пазов 30). Для выполнения данной операции используется вертикально-фрезерный станок с ЧПУ (мод. МА655СА). Обработка ведется при следующих режимах: n = 220 мин$^{-1}$ (V = 7 м/мин.) и подаче Sм = 70 мм/мин., режущий инструмент выполняется из инструментального сплава Р9К5.

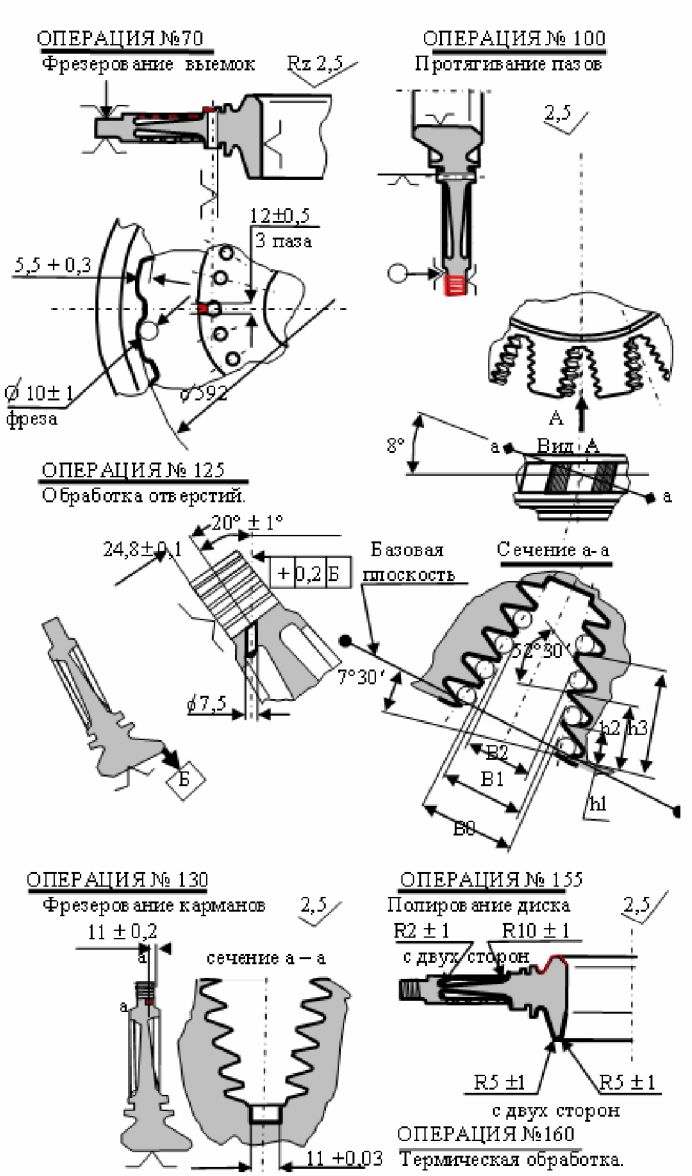


Рис. 4.6. Вторая часть технологического процесса изготовления дисков первой ступени турбины

Данная операция выполняется на настроенном станке по разработанной программе концевой фрезой диаметром 11…9 мм. Режущий инструмент врезается на глубину 5,5 мм и осуществляет круговое движение на диаметре 529 мм. При достижении ширины паза равной 58 мм фреза отводится от заготовки. После этого осуществляется перемещение фрезы на холостом ходу ($S_м$ = 250 мм/мин) в рабочее положение для обработки второго паза и т.д.

Этой же фрезой осуществляется обработка трех пазов на усиленном пояске диска. При обработке данных пазов выполняются операционные размеры (на рис. 4.6. не показан) и (12±0,5 мм).

На операции № 75 производится фрезерование пазов с другой стороны диска. При этом также используется станок с ЧПУ мод. МА655СА.

Контроль выполнения геометрических параметров в этой части технологического процесса производится периодически с помощью универсального и специального контрольно-измерительного инструмента, так как расположение контура пазов обеспечивается технологически за счет применения специального станочного приспособления и управляющей программы станка. Станочное приспособление периодически контролируется и паспортизуется.

Операция №80 - фрезерование 12 пазов, расположенных на конусной образующей диска, на горизонтально-фрезерном станке мод. FV-40B. При выполнении этой операции используется специальное поворотное приспособление, ось которого повернута в пространстве. Это приспособление позволяет обеспечить необходимое угловое расположение пазов на диске.

Слесарная обработка (операция №85) заключается в зачистке острых кромок и скруглении радиусов переходов различных поверхностей. Для выполнения этой операции используются инструментальные шарошки, шлифовальные круги и шлифовальные шкурки. Для создания движения инструмента применяются высокоскоростные пнемошлифовальные головки.

Операция №100 – протягивание пазов наиболее важная операция данной части технологического процесса (рис. 4.6.). От качества выполнения данной операции зависят основные показатели работы диска и всего колеса турбины. Надежность исполнения параметров пазов в заготовке на этой операции определяются режущим инструментом, применяемым оборудованием и назначенными режимами протягивания.

Эта операция выполняется на горизонтально-протяжном станке мод. 7Б56У. При протягивании применяется специальное поворотное приспособление с пневмогидравлическим закреплением заготовки и подвижной частью этого приспособления. Протягивание проводится сборными фасонными протяжками, которые устанавливаются и точно ориентируются в технологической системе. Перемещение протяжек выполняется по специальным направляющим корпуса станочного приспособления.

Перед выполнением этой операции производится протягивание паза на технологическом образце (операция №90), который подвергается тщательному контролю всех геометрических параметров и качества обработанных поверхностей.

На основании полученных результатов контроля технического обрзца, дается заключение о соответствии качества с заданным. Это заключение определяет возможность проведения операции №100 на рабочем диске турбины.

При протягивании пазов заготовка ориентируется в технологической системе по основным базовым поверхностям. Протягивание всех (83) пазов производится предварительной протяжкой, затем протяжками 2,3,4. Последняя протяжка формирует окончательный профиль пазов в диске. На этом этапе обеспечиваются:

1) базовая плоскость паза (см. рис. 4.1) и ее положение относительно технологических установочных поверхностей;

2) угол профиля впадины замка φ (52°30′±5′);

3) угол расположения профиля паза относительно базовой плоскости (α = 7°30′±5′);

4) шаг зубьев паза h_1 = (3,15±0,01) мм, h_2 = (6,3±0,01) мм, h_3 = (9,45±0,01) мм, h_4 = (12,6±0,01) мм;

5) ширина пазов B_1 = (14,19+0,12) мм, B_2 = (12,56+0,12) мм, B_3 = (10,93+0,12) мм, B_4 = (9,3+0,12) мм;

6) угол расположения паза относительно оси диска 8°±10′;

7) точность расположения левой и правой части паза относительно друг друга в осевом направлении 0,02 мм.

Поворотное делительное приспособление и сборная протяжка обеспечивают также точность расположения пазов относительно технологически базовых поверхностей в осевом и радиальном направлении и относительно друг друга. Расстояние базовой плоскости (рис. 4.1, 4.6) до оси диска (334,4±0,15) мм. На этой операции выполняется располо-

жение пазов относительно друг друга и относительно оси диска. Величина допустимого смещения при этом должна быть не более 0,08 мм.

С целью обеспечения этих заданных значений показателей качества заготовок перед выполнением операции №100 производится тщательная выверка и контроль станочного приспособления.

Протягивание пазов производится при скорости протяжки v = 1,2 м/мин. Для достижения высоких показателей по шероховатости поверхностей (R_a = 2,5мкм) при протягивании обеспечивается обильное охлаждение и смазывание поверхностей, подвергающихся обработке. В процессе протягивания осуществляется тщательный контроль над удалением стружки из зоны обработки.

На рис. 4.7 представлена схема протягивания пазов в дисках турбины. Приспособление *2* (рис. 4.7,а) устанавливается и закрепляется на корпусе станины *1* протяжного станка. Корпус *3* поворотной части станочного приспособления развернут к оси паза диска турбины на угол α. Заготовка *6* центрируется в технологической системе по пояску *ц* и фиксируется по отверстию *ф* (рис. 4.7,б).

Опорная поверхность заготовки размещается в непосредственной близости от места приложения силы протягивания $P_{пр}$. Делительный диск *5* приспособления и заготовка *6* после протягивания паза производят поворот на шаг. Перед этим выполняется подъем заготовки совместно с делительным диском на высоту *H* и перемещение протяжки *7* в крайнее правое положение. Поворот делительного диска фиксируется специальным устройством *4*. Подъем и поворот заготовки выполняются в полуавтоматическом режиме специальной гидравлической системой.

После протягивания всех пазов в диске турбины осуществляется смена сборной протяжки *7*.

В направляющие элементы *8* станочного приспособления *2* устанавливается следующая сборная протяжка. Последняя, чистовая протяжка формирует основные показатели профиля паза.

От качества заточки, настройки сборной протяжки, от режимов обработки, величины удаляемого слоя металла при протягивании, от степени охлаждения зоны обработки и других факторов зависят качественные показатели паза.

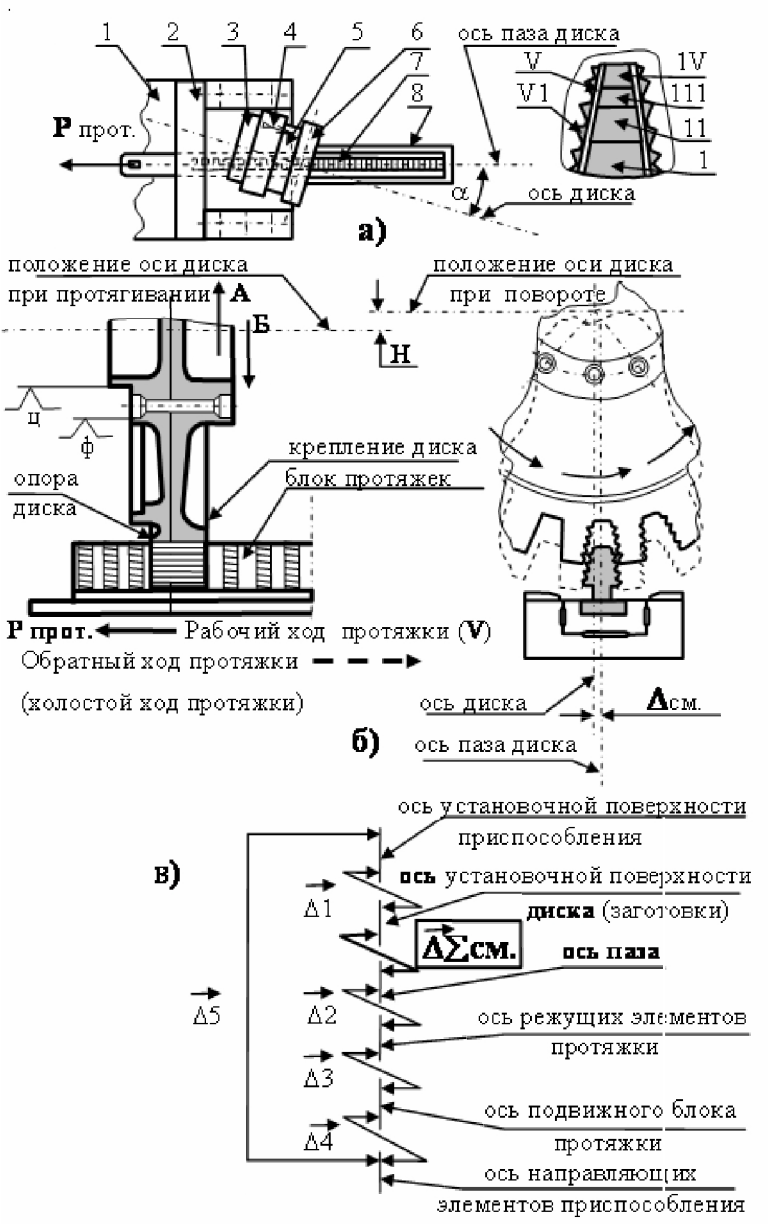


Рис. 4.7. Схема протягивания пазов в дисках турбины

Точность расположения паза диска относительно оси установочной поверхности ц зависит от составляющих производственных погрешностей. На представленной схеме (рис. 4.7,в) суммарный вектор смещения $\vec{\Delta}_{\sum см}$ этих осей относительно друг друга определяется суммой составляющих векторов:

$$\vec{\Delta}_{\sum см} = \vec{\Delta}_0 + \vec{\Delta}_1 + \vec{\Delta}_2 + \vec{\Delta}_3 + \vec{\Delta}_4,$$

где $\vec{\Delta}_0$ – вектор смещения оси паза диска, относительно оси установочного базового элемента приспособления. Эта погрешность обработки определяется процессом резания металла при протягивании; $\vec{\Delta}_1$ – вектор смещения оси режущих элементов протяжки относительно установочных поверхностей подвижного блока сборной протяжки. Эта погрешность возникает в процессе изготовления или переточки сборной протяжки; $\vec{\Delta}_2$ – вектор смещения оси подвижного блока протяжки относительно направляющих элементов станочного приспособления. Это смещение определяется возможным зазором между направляющими элементами станочного приспособления и сборной протяжки; $\vec{\Delta}_3$ – вектор смещения направляющих элементов станочного приспособления относительно установочного (центрирующего) элемента этого приспособления; $\vec{\Delta}_4$ – вектор смещения установочной поверхности заготовки относительно установочного элемента станочного приспособления. Погрешность установки заготовки на станочном приспособлении определяется возможным зазором между заготовкой и установочным элементом приспособления.

Предельное суммарное поле рассеяния модуля вектора смещения $\pm\rho_{\sum см}$ оси паза относительно оси диска определяется суммой полей рассеивания составляющих элементов:

$$\pm\rho_{\sum см} = \pm(\rho_0 + \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4).$$

В примере эта величина не должна превышать заданного смещения паза относительно оси диска ±0,08 мм.

Определим вероятные ожидаемые значения суммарного поля рассеивания модуля вектора $\pm\rho_{\sum см}$ [10,14,15].

По известным предельным значениям составляющих векторов, принятым в соответствии с чертежной сборной протяжки и станочного приспособления, учитывая используемые в операции методы проверки положения детали в технологической системе, определим наиболее ве-

роятные ожидаемые значения смещений осей пазов диска относительно номинального положения.

Известны: ρ_0=(0 ±0,01) мм; ρ_1=(0± 0,01) мм; ρ_2=(0 ±0,015) мм; ρ_3=(0 ±0,01) мм; ρ_4=(0 ±0,025) мм;

Тогда предельная величина смещения

$$\pm\rho_{\sum см} = \pm0{,}01\pm0{,}01\pm0{,}015\pm0{,}01\pm0{,}025 = \pm0{,}07 \text{ мм}.$$

Коэффициент теоретико-вероятностного суммирования K производственных погрешностей позволяет определить наиболее вероятное значение ожидаемого смещения осей по формуле (3.1):

$$\text{Вер}\pm\rho_{\sum см} = K\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{\rho_i}\ .$$

Принимая количество составляющих звеньев n= 5; отношение максимального поля рассеивания модуля вектора к минимальному полю рассевания c = 2,5; коэффициент, определяющий соотношение систематической и случайной составляющих производственных погрешностей η= 0,5; процент производственного риска p=0,5% в соответствии с прил. 2, получим коэффициент K = 0,6. Тогда Вер$\pm\rho_{\sum см}$ = 0,6·0,07 = ± 0,042 мм.

Это наиболее вероятное ожидаемое значение имеет запас точности по отношению к заданному предельному допустимому смещению (±0,08 мм) осей. Коэффициент точности для данного важного параметра диска турбины K = 0,042/0,08 = 0,525 показывает, что процесс протягивания пазов в диске турбины для данного анализируемого параметра выполняется с достаточной точностью.

После выполнения операции №100 производится *вторичное протягивание технологического образца (операция* №105).Технологический образец после протягивания подвергается тщательному контролю (операция №110) всех заданных геометрических параметров паза. По результатам измерения образца дается заключение о возможности дальнейшего использования комплекта протяжек.

После выполнения указанных операций диск турбины подвергается слесарной обработке и промывке.

Обработка отверстий для подачи воздуха во внутреннюю полость лопатки производится на вертикально-сверлильном станке моделей 2110, 2125 и др. с использованием специального поворотного кондуктора.

Операция №130 – обработка отверстий для фиксации лопаток в пазах диска также осуществляется на вертикально-сверлильном станке

с использованием специального поворотного приспособления-кондуктора.

После выполнения слесарной обработки острых кромок и радиусов скругления (операция №140), промывки диска (операция №145), он подвергается полированию (операция №155). Предусматриваются отделка полотна диска с двух сторон и полирование радиусов перехода для плоских, цилиндрических и конических поверхностей. При полировании используют специальное станочное приспособление, шлифовальные круги 24А16СТК, абразивные порошки (зерно 24А) и шлифовальные шкурки. Полирование используются пневмо-шлифовальные головки ПШТ-2. Выполнение данной операции сопровождается тщательным контролем состояния поверхностей и поверхностного слоя (прижоги при обработке на поверхности не допускаются).

Вторая часть технологического процесса завершается проведением *термической обработки диска* (операция №160). При выполнении термической операции производится отжиг и последующий отпуск на воздухе.

Третья часть технологического процесса (*операции* №165-185) предусматривает абразивно-жидкостную обработку основных поверхностей диска окончательное формирование конструкторских и рабочих поверхностей, отделку отверстий под призонные болты и проведение окончательной слесарной обработки.

Операция №165 - *гидроабразивная струйная обработка (ГАО) основных поверхностей диска* сокращает трудоемкость слесарно– зачистных и слесарно-полировальных работ, которые при изготовлении ГТД составляют до 40% общей трудоемкости изделия [34]. Применение струйной гидроабразивной обработки обеспечивает повышения качественных показателей параметров поверхностей и поверхностного слоя. Это приводит к увеличению ресурса и надежности работы изделия.

Применяемый метод обработки обладает высокими технологическими возможностями и применяется:

для скругления острых кромок и сопряжения радиусов, полирования и шлифования сложных поверхностей;

удаления заусенцев;

снятия со всех поверхностей дефектного слоя;

снятия небольшого припуска с целью снижения шероховатости и удаления различных повреждений с поверхности детали.

Данный процесс использует эффект удара абразивных частиц об обрабатываемую поверхность заготовки [35]. Процесс гидроабразивной

струйной обработки заключается в направлении струи суспензии, состоящей из воды и частиц абразивных материалов, на обрабатываемую поверхность заготовки. Струя подвергается воздействию потока сжатого воздуха, который увеличивает скорость истечения суспензии из сопла. Действие режущей кромки абразивных частиц на обрабатываемую поверхность непродолжительно и имеет ударный характер. Количество ударов в 1 с абразивных частиц колеблется в зависимости от условий обработки от $2 \cdot 10^6$ до $25 \cdot 10^6$.

Струйная гидроабразивная обработка не создает направленной шероховатости, обеспечивает упрочнение обрабатываемой поверхности, вследствие чего повышается усталостная прочность обрабатываемых деталей.

Основными геометрическими параметрами струйного аппарата с сужающимся смесительным соплом являются [34]:

диаметр смесительного сопла d_c;

диаметр активного сопла (жиклера) d_a.

отношение площадей смесительного и активных сопел F_c/F_a;

расстояние между входным сечением активного сопла и выходным сечением смесительного сопла a;

длины смесительного сопла l_c;

длины цилиндрической части смесительного сопла l_y;

угол сходимости конусной части смесительного сопла G(рис. 4.8).

Суспензия подается в струйный аппарат при помощи насоса. Управление установкой электропневматическое. Основными узлами установки являются камера *2* с ребристым днищем, в которой устанавливается обрабатываемая заготовка *9*, и струйный аппарат *7*. Нижняя часть камеры служит емкостью для гидроабразивной суспензии, здесь же размещены пневматические барбатеры *1* для взвешивания абразивных частиц в жидкости. Для настройки струйного аппарата установлены механизмы *4* и *6*.

При вращении маховика *5* осуществляется перемещение струйного аппарата в вертикальной плоскости. В зависимости от положения маховика *3* струйный аппарат может перемещаться в горизонтальной плоскости и поворачиваться вокруг горизонтальной оси на угол 90°.

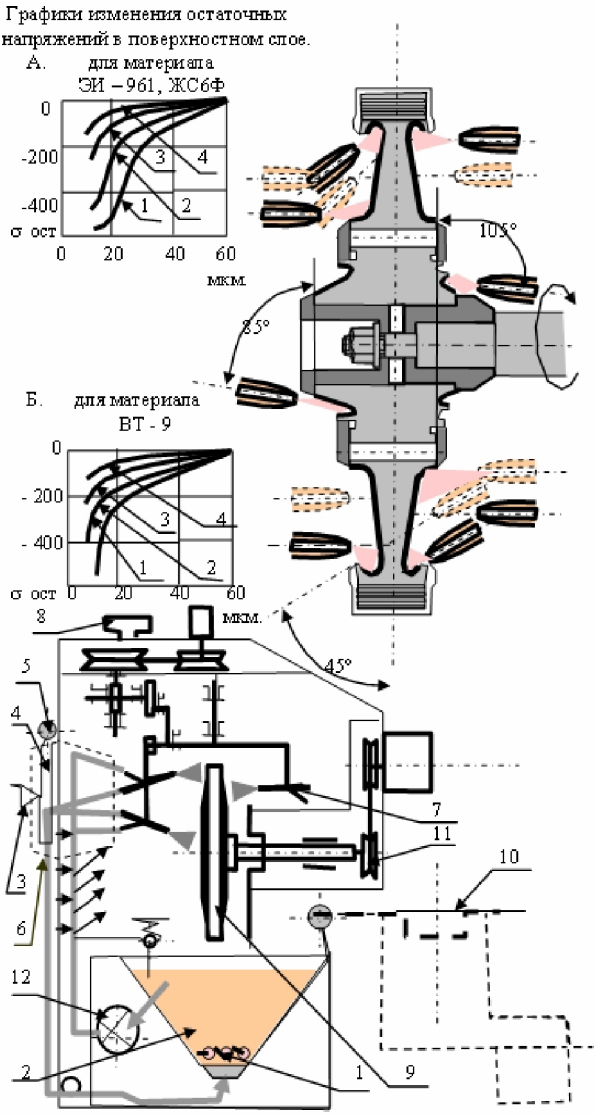


Рис. 4.8. Схема гидроабразивной струйной обработки (ГАО) диска турбины ГТД и изменение остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ в поверхностном слое для материалов ЭИ-961, ЖС6Ф (а) и ВТ-9 (б) при основных параметрах обработки(концентрация абразивных частиц в суспензии К – 20%; $p_в$=0,4 МПа; L=100 мм; угол наклона оси сопла α=45°): 1 – для 24А10; 2 – для 24АМ63; 3 – для 24АМ40; 4 – для АМ20

Для крепления обрабатываемой заготовки и загрузки ее в камеру предусмотрен стол *10*, который с помощью подъемного механизма может поворачиваться из горизонтального в вертикальное положение. Обрабатываемая заготовка вращается от приводного ролика *11*, связанного с фрикционной передачей при вертикальном положении стола. Отработанный воздух через затвор *8* поступает в воздухоочиститель, суспензия из рабочей ванны в струйный аппарат подается специальным пескостным насосом *12* (ЭПСР-6).

Характеристика струйно-абразивной установки для обработки деталей типа дисков приведена ниже:

Наибольшая масса обрабатываемых изделий, кг	800
Размеры обрабатываемого изделия, мм:	
наружный диаметр	300 ... 1500
внутренний диаметр	100 ... 500
высота	20 ... 200
Частота вращения заготовки, $мин^{-1}$	1
Мощность электродвигателя, кВт	15
Давление воздуха в струйном аппарате, МПа	0,2 ... 1,0
Расход воздуха, $м^3$/мин	5 ... 20
Масса загружаемых абразивных материалов, кг	300
Производительность насосной установки, $м^3$/час	50 ... 80

Для обработки полотна диска применяется несколько схем.

Струйный аппарат (или несколько струйных аппаратов) совершают возвратно-поступательное движение по радиусу диска, диск вращается. При этой схеме движения абразивной суспензии на полотне диска создается петлеобразный замкнутый контур. Отношение частоты колебаний струйного аппарата к частоте вращения диска не должно быть целым числом, что обеспечивает несовпадение петель на образующей полотна диска.

Однако такая схема не обеспечивает равномерного съема металла с полотна диска, так как различные участки поверхности находятся под воздействием гидроабразивной струи разное время. Изменение скорости перемещения струи по радиусу позволяет создать спираль Архимеда на образующей полотна диска, шаг которой выбирается в соответствии с рекомендациями [34]. Это позволяет обеспечить более равномерный съем металла по образующей поверхности заготовки.

В практике производства деталей ГТД используется также схема обработки с дискретным перемещением струйного аппарата и с неподвижными струйными аппаратами установок, а также аппараты со щелевыми соплами.

При обработке дисков турбины ГТД используется установка 33-106, которая позволяет производить двухстороннюю обработку полотна заготовок.

Состав рабочей смеси суспензии, для заготовки диска турбины первой ступени имеет следующие параметры:

Шлифовальное зерно – электрокорунд	
белый	23А...25А
нормальный	12А...18А
хроматит	91А...94А
Концентрация зерна, %	15...20
Размеры частиц, мм	0,14…0,4
Длина металлического сопла, мм	8…9
Внутренний диаметр сопла, мм	8…9
Внутренний диаметр жиклера, мм	5…5,2
Частота вращения заготовки, мин$^{-1}$	0,25
Давление воздуха, подводимого к металлическому соплу, МПа	0,35
Число двойных ходов в мин	20…27
Съем металла, мм	0,18 ± 0,03
Время обработки, мин	30…45

Поверхность при ГАО имеет шероховатость не ниже 2,5 R_a. Общая глубина распространения остаточных напряжений не превышает 50...60 мкм. Максимум напряжений находится на поверхности, причем наблюдается резкое снижение этих напряжений в слое толщиной 5...15 мкм.

На рис. 4.8, а, б представлены изменения остаточных напряжений $\sigma_{\text{îñò.}}$, полученных при исследовании образцов.

Представленный технологический процесс изготовления дисков турбины ГТД отражает основные направления создания качественных показателей заготовок на основных этапах обработки. Он показывает так же особенности обработки заготовок на отдельных операциях, применение различных приемов по выполнению заданных технических требований.

В зависимости от состояния производственной культуры, средств оснащения производственных процессов, экономической целесообразности и других факторов при изготовлении как дисков турбины, так и других деталей ГТД могут быть приняты различные варианты технологических процессов, но выполнение заданных качественных показателей деталей, сборочных единиц и изделий всегда будет необходимым и первостепенным.

Обеспечение и улучшение качественных показателей с целью создания конкурентоспособности изделия постоянно ставят задачи совершенствования технологических процессов производства. Эти задачи определяют непрерывность процесса совершенствования производства ГТД конструкторско-технологическими методами.

ГЛАВА 5
ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВАЛОВ

5.1. КОНСТРУКЦИЯ, ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ И МАТЕРИАЛЫ

Валы ГТД отличаются большим разнообразием по конструктивной форме и назначению. Валы турбины, компрессоров, приводов различных агрегатов представляют собой комбинации гладких цилиндрических и конических шеек, фланцев, шлицевых элементов, резьб, отверстий, зубчатых колес и других элементов. Валы работают при высоких оборотах, повышенных температурах, передают значительные крутящие моменты, подвержены высокочастотным колебаниям. При этом они должны иметь минимальную массу и высокую надежность в работе.

Валы ГТД, представленные на рис. 5.1 отличаются ажурностью, сложностью конструктивной формы и наличием большого количества ответственных элементов. Ступенчатый вал с фланцевым элементом соединяется с турбиной (рис. 5.1,*а*). Вал, представленный на рисунке 5.1, *б* имеет коническую образующую значительной протяженности с малой толщиной стенки. Вал цилиндрической формы, представленный на рис. 5.1, *в* отличается «закрытой» формой внутренней поверхности, которая также создает тонкостенную конструкцию с большим количеством ответственных элементов.

Представленные валы имеют основные и вспомогательные конструкторские поверхности, которые определяют положение этих валов в изделии и создают «ось детали». Конструкторские поверхности валов, как правило, выполняются в пределах 5-го квалитета точности. Расположение конструкторских поверхностей относительно друг друга также обеспечивается с высокой точностью.

На рис. 5.2 представлен вал низкого давления ротора ГТД значительной протяженности (длина вала равна 2440 мм). Вал обеспечивает работу турбины низкого давления и соединяет ее с ротором компрессора (см. рис. 1.1).

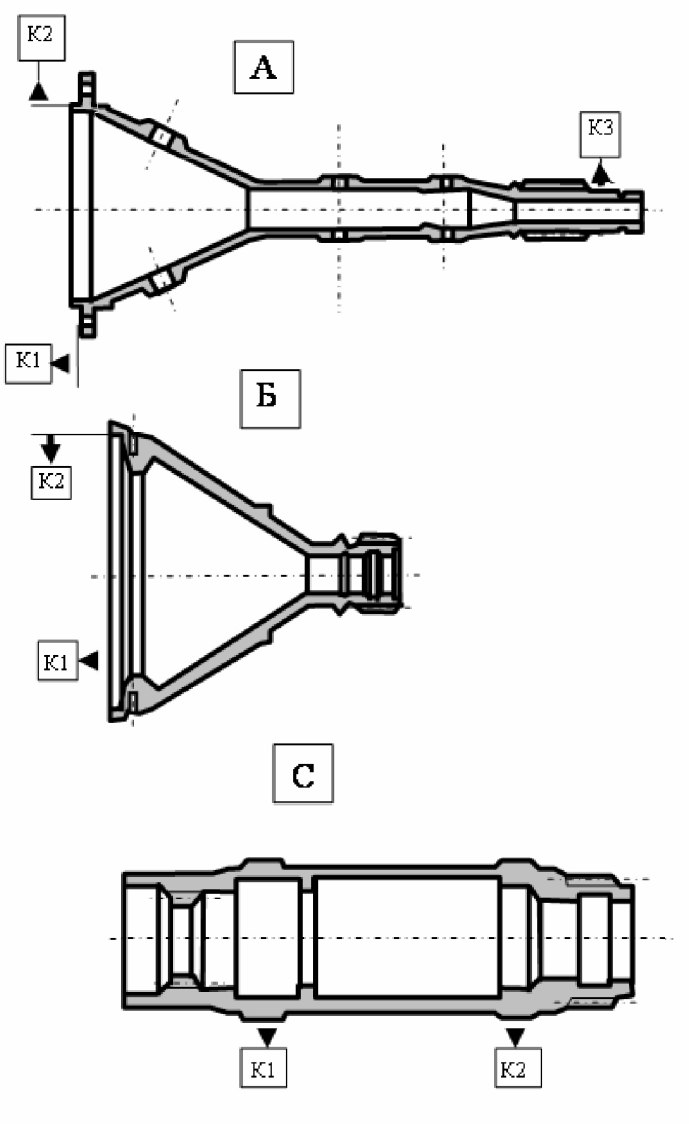


Рис.5.1. Валы роторов ГТД:
а – ступенчатый с фланцевым элементом; *б* – с конической образующей;
в– с закрытой формой внутренней поверхности

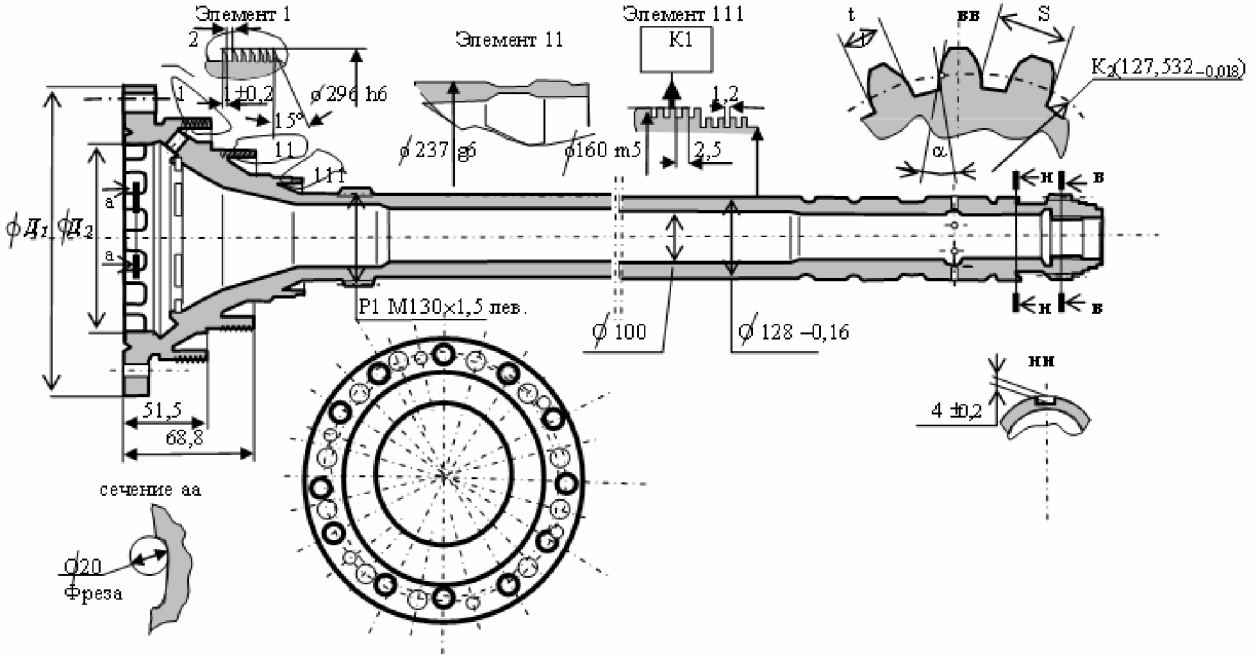


Рис. 5.2. Вал ротора низкого давления ГТД

Валы газовых турбин являются ответственными деталями роторной части двигателя. Значительная частота вращения роторов, большие нагрузки от действия осевых и радиальных сил создают высокие напряжения в валах и требуют повышенной точности обработки и балансировки при их изготовлении.

В начале развития авиационной техники применялись «жесткие» валы, частота вращения которых была ниже расчетной. Эти валы при высокой жесткости, имели значительную массу. Стремление к снижению массы двигателя привело к использованию «гибких» роторов ГТД. Валы для «гибких» роторов отличаются наличием тонкостенной ажурной конструкции, имеют сложный контур наружных и внутренних поверхностей, создающих равнопрочную конструкцию.

Роторы «гибких» турбин и компрессоров различных схем должны обладать способностью быстрого перехода зоны критической частоты вращения. Этот переход определяется мощностью газовой турбины над мощностью, потребляемой компрессором. Валы воспринимают значительные перепады силовых и температурных нагрузок при различных режимах эксплуатации ГТД. Они должны подвергаться тщательной балансировке и иметь минимальную неуравновешенность массы по всему профилю. Внешние воздействия на гибкие роторы определяются неравномерностью потока газа на рабочие лопатки турбины и компрессора, неравномерностью работы шестерен редукторов, подачей масла в зону смазки подвижных элементов, несносностью осей рабочих поверхностей валов, возможными перекосами в радиальных и торцевых соединениях и т. д.

Валы редукторов, приводов турбонасосных агрегатов и других элементов ГТД также обладают малой массой, их форма приближена к равнопрочной конструкции.

Валы ГТД изготавливаются из различных сталей и сплавов. Материалом для валов ГТД служат высококачественные низкоуглеродистые легированные стали 18ХН3А, 12ХН3А, 15Х12Н2МВФАБ. Поверхности низкоуглеродистых сталей подвергаются цементации. В процессе цементации на глубину 0,7…1,2 мм, закалке и отпуску стали 18ХН3А, 12ХН3А получают твердость на поверхности 58 HRC, $\sigma_в$ = 1000…1200 МПа, δ = 11...15%, 390 НВ, ψ = 55…70%.

Легированные стали с повышенным содержанием углерода, 38 ХА, 38ХМЮА, 40ХНМА приобретают повышенную твердость за счет закалки и отпуска. Эти стали, могут также подвергаться термохимическому улучшению за счет азотирования поверхностей. При азотирова-

нии поверхностей конструкторских и рабочих шеек валов достигается твердость 65 HRC. Для валов разового использования применяются углеродистые стали (40, 45 и др).

Для оценки технологичности конструкции, основных требований по точности и расположению основных поверхностей и других особенностей рассмотрим вал ротора низкого давления ГТД(рис.5.2.). Этот вал изготавливается из высокопрочной корозионностойкой, жаростойкой и жаропрочной легированной стали 15Х12Н2МВФАБ. Химический состав этой стали следующий, %: 0,15 углерода, 12 хрома, 2 никеля, 1 молибдена, 1 вольфрама, 1 ванадия. Эта сталь по химическому составу улучшена, вредные примеси уменьшены до минимума. Данные получены методом электрошлакового переплава.

Механические свойства стали 15Х12Н2МВФАБ приведены ниже.

Твердость НВ ..... 321 ... 388
Коэффициент обрабатываемости K..... 0,3
Скорость резания, м/мин, резцами:
из твердого сплава 65
из быстрорежущей инструментальной стали. 20

Длинный полый вал имеет плавный переход во фланец значительных габаритных размеров. Наружная поверхность вала, примыкающая к фланцу, имеет коническую образующую с цилиндрическими поясками. На этих поясках размещены лабиринтные уплотнения (элемент I), на цилиндрическом пояске в средней части (элемент II) устанавливается уплотнение для разделения воздушных сред с различными физическими свойствами. Третий поясок (элемент III) является основной конструкторской поверхностью вала (диаметр шейки вала равен 160m5). На этом пояске выполняется спиральная канавка. Канавка служит для подвода и отвода тепла из рабочей зоны подшипника. Подшипник устанавливается на цилиндрическую поверхность и прижимается к опорному торцу K_3 с помощью гайки.

На наружной цилиндрической поверхности вала имеется резьба М130 × 1,5 (левая), вдоль образующей цилиндрическая поверхности (стебля) вала – канавки глубиной 2…3 мм. На этой поверхности размещены также замковые и шлицевые элементы (сечения в-в, н-н, вид А и др.). На конце вала в шахматном порядке размещены шесть радиальных отверстий диаметром 22 мм. Эти отверстия служат для подвода «хо-

лодного» воздуха от компрессора для охлаждения вала в данной зоне. Шлицы, расположенные на конце вала (сечение в-в) предназначены для соединения ротора компрессора с турбиной.

Шлицевые элементы являются второй основной конструкторской поверхностью, так как определяют, совместно с поверхностью K_1 положение вала в двигателе. Образующая поверхность шлицов выполняется в виде эвольвенты с модулем, равным 2,5, число зубьев 50. Угол профиля на делительной окружности 20°. Наружная поверхность шлицевого венца выполняется с высокой точностью.

Внутренний профиль вала имеет сложный фасонный контур, переходящий от конической поверхности у большого фланца в цилиндрическую форму. У большого фланца методом фрезерования выполняются 12 фасонных выступов, протачивается торцовая коническая канавка и создается коническая образующая поверхность во внутренней полости вала, приближая его к равнопрочной конструкции.

Торцовые поверхности большого фланца выполняются с высокой точностью. Точность формы и расположения этих поверхностей относительно основных конструкторских баз (K_1, K_2) обеспечивает качественное соединение элементов ротора компрессора. Во фланце размещены 24 отверстия диаметром 10+0,016 мм, шесть резьбовых отверстий М8 и 12 отверстий диаметром 12р6. Эти отверстия служат для надежного соединения вала с ротором компрессора. Кроме этого на конической образующей вала, в зоне первого цилиндрического пояска (элемент 1) размещаются 6 косых отверстий 10 мм.

Высокие требования к валам, особенно гибких роторов, предъявляются к расположению конструкторских, рабочих и свободных поверхностей. В табл. 5.1 представлены требования по расположению основных поверхностей валов относительно друг друга.

На основании анализа представленной конструкции вала ротора низкого давления отметим некоторые особенности валов ГТД:

высокие требования к материалу вала и контролю его качественных показателей;

небольшой коэффициент обрабатываемости металла методами лезвийной обработки. Для вала низкого давления ротора ГТД он равен 0,3;

сложная конструкция с наличием на образующих поверхностях значительного количества ответственных рабочих элементов, выемок, канавок, отверстий и различных облегчений.

Таблица 5.1. – Требования по расположению основных поверхностей валов

Поверхность	Диаметр	Требование к поверхности и ее расположению
$K1$	О 160 m5	О 0,01 = 0,01
K_2	⌀127,532	О 0,01 = 0,01 ↗ 0,005 К1
K_3		▱ 0,01 ↗ 0,01 К1
$Д_1$	⌀ 346,5h7	↗ 0,03 К1, К2
$Д_2$	⌀ 264 М7	↗ 0,03 К1, К2
Т		▱ 0,01 ↗ 0,02 К1, К2
T_1		▱ 0,01 // 0,02 Т
$Д_3$	⌀ 296 h6	О 0,02 ↗ 0,03 К1, К2
$Д_4$	⌀ 237 g6	О 0,02 ↗ 0,03 К1, К2
Свободные поверхности Ci	10 – 13 квалитет	Биение цилиндрических поверхностей ↗ 0,06…0,1 К1, К2 Биение торцевых поверхностей не более 0,06 мм

Примечание. Виды допусков: О – круглости; ▱ – плоскостности; =– профили продольного сечения; // – параллельности; ↗– биения в заданном направлении, радиального, торцевого.

высокие требования к качеству конструкторских и рабочих поверхностей вала;

повышенные требования к расположению свободных поверхностей относительно номинального положения (допустимое биение этих поверхностей, относительно номинального положения не более 0,08 мм);

высокие требования к качеству поверхностей и состоянию поверхностного слоя;

повышенные требования к сбалансированности вала после механической обработки.

5.2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВАЛОВ

Материал вала ротора турбины ГТД относят к первой группе контроля, которая предусматривает проверку качественных показателей металла для каждого вала. Исходя из этого в первой части технологического процесса механической обработки вала производится отрезка технологического образца (специальной прибыли). Технологический образец подвергается в лабораторных условиях испытаниям по оценке качественных показателей материала вала. На основании полученных положительных результатов анализа материала разрешается проведение дальнейшей обработки вала.

Заготовки валов в машиностроении получают различными методами: штамповкой, прессованием, штамповкой на горизонтально ковочных машинах, поперечным прокатом, а также с использованием ротационного обжатия и выдавливания.

Ковка осуществляется на паровоздушных молотах двойного действия, гидравлических прессах и горизонтально-ковочных машинах. В табл. 5.2 представлены возможности получения различных заготовок методом ковки на различном оборудовании.

Получить исходную заготовку вала высокой точности методом ковки весьма сложно. В процессе формирования поверхностей заготовки ковкой используются универсальные приемы: осадка, протяжка, прошивка, гибка, скручивание, отрубка, сварка и т.д. В процессе выполнения этих операций происходят объемные и температурные изменения, появляется окалина, искажение формы поверхностей и другие явления, связанные с процессом ковки различных металлов. Этот метод позволяет получить заготовки сложной формы, имеющие значительные припуски и напуски на последующую механическую обработку.

На рис.5.3,*а* показана тяжелая поковка вала, полученная методом ковки на гидравлических ковочных прессах.

Принятые в соответствии с нормалями допуски, припуски и напуски на поверхностях заготовки создают значительный слой металла для механической обработки валов.

С целью уменьшения припуска на механическую обработку валов используют и другие методы горячего деформирования материала и исходным заготовкам придают форму, близкую к форме готовой детали [32, 33].

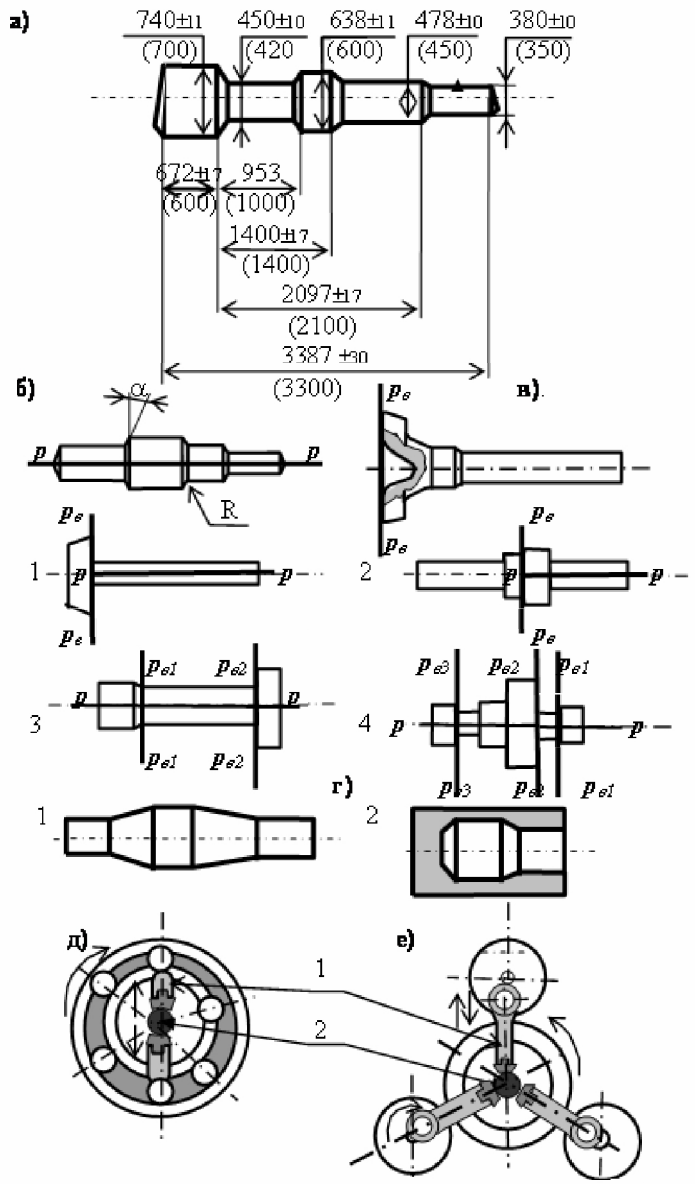


Рис. 5.3. Виды формирования исходных заготовок вала
(в скобках даны размеры готовой детали)

Таблица 5.2. – Возможности получения заготовок методами ковки

Оборудование	Масса падающей части	Средняя масса фасонной поковки, кг	Средняя масса валов прямого типа, кг
Паровоздушный молот двойного действия	50 кг 1 т 5 т 8 т	20 20 350	от 7 до 250 250 2500
Гидравлический ковочный пресс	Сила 150 МН (15000 тс)	Более 100	Более 750

На рис. 5.3,*б* показаны схемы заготовок валов, полученные при штамповке в открытых или закрытых штампах. Такой способ получения исходных заготовок позволяет выполнить размеры с более высокой точностью, чем при свободной ковке. В процессе штамповки осуществляется копирование профиля гравюр штампов на контур заготовки. В этом случае рассеивание геометрических параметров штамповок значительно меньше, чем при ковке. Систематические постоянные производственных погрешностей при этом могут быть сведены к минимуму благодаря корректировке размеров гравюр штампов в процессе доводки производства исходных заготовок.

При создании конструкции штамповок важен выбор линий разъема штампов. Линия разъема между штампами выбирается исходя из конструктивных особенностей детали. В приведенном примере она имеет горизонтальное (рис. 5.3,*б*) или вертикальное (рис. 5.3,*в*) положение. Штамповочные уклоны (угол α) и радиусы (R) переходов поверхностей заготовок принимают различные значения в зависимости от протяженности поверхностей заготовок, от свойства обрабатываемого материала и других факторов [32, 33].

При штамповке на молотах и прессах в открытых или закрытых штампах возникают штамповочные уклоны в отверстиях до 10…15°, а на наружных поверхностях 3…7°. Радиусы переходов конических образующих поверхностей в плоские поверхности колеблются от 3 до 10 мм в зависимости от габаритных размеров штамповок. В процессе штамповки заготовки возможны смещения верхней и нижней половин штампов друг относительно друга. Эти смещения могут достигать 1…2 мм и более.

Приведенные особенности формирования заготовок при штамповке определяют припуски и напуски на дальнейшую механическую обработку валов.

Выбор способа получения исходной заготовки для валов зависит также от вида производства, годовой программы выпуска деталей, наличия производственных средств, экономических возможностей и др.

Для валов небольших габаритных размеров штамповка выполняется на горизонтально-ковочных машинах. Этот вид штамповки позволяет создать на наружной образующей поверхности исходной заготовки вала, выступающие элементы, а во внутренней полости – внутренний контур. Возможность получение такого контура зависит от габаритных размеров внутренней полости вала и особенностей конструкции штамповки. Важной особенностью при штамповке на горизонтально-ковочных машинах является возможность создавать поверхности без штамповочных уклонов.

Горизонтально-ковочные машины представляют собой кривошипные горячештамповочные прессы силой 1…31,5 МН (100…3150 тс). В горизонтально-ковочных машинах используются два разъема: первый разъем p находится между неподвижной многоручьевой матрицей и ее подвижной половиной (рис. 5.3,*г*). Второй разъем $p_в$ выполняется между подвижными пуансонами и сборной матрицей (рис. 5.3).

Процесс штамповки на горизонтально-ковочной машине выполняется следующим образом. Пруток или штучная заготовка устанавливается в неподвижную половину матрицы и фиксируется подвижной половиной. Осевое перемещение прутка или штучной заготовки ограничивается специальным упором. При движении пуансонов в горизонтальном направлении упор отводится. Такая схема штамповки позволяет, перемещая заготовку из одного рабочего ручья горизонтально-ковочной машины в другой, производить перемещение второй плоскости разъема $p_в$ штампов вдоль оси заготовки (рис. 5.3, г).

Так, при формировании окончательного профиля исходной заготовки в штампе горизонтально-ковочной машины, разъем $p_в$ используется один раз (позиции *1* и *2*), при формировании нескольких выступов на образующей поверхности вала (позиции *3*, *4*) количество рабочих ручьев и соответственно разъемов в матрицах будет увеличено (количество разъемов соответственно составит два и три).

Для создания выступов на заготовке в процессе штамповки она перемещается из одного ручья штампа в другой. При необходимости положение заготовки в штампе может изменяться на угол в 180°. Гори-

зонтально-ковочная штамповка позволяет также получать внутренний контур и сквозные отверстия в заготовке.

С целью уменьшения припуска на механическую обработку валов используют ротационное обжатие и ротационное выдавливание при формировании контура исходной заготовки. На рис. 5.3,*д* показаны схемы формы заготовок, которые могут быть получены при использовании этих методов.

Процесс ротационного обжатия позволяет улучшить структуру металла и повысить его механические свойства.

Сущность процесса состоит в следующем: прутковая заготовка подвергается обжатию бойками, движущимися навстречу друг другу (рисунок 5.3,е). При движении бойки осуществляют возвратно-поступательные перемещения за счет эксцентриситетов приводного вращающегося устройства. У разных конструкций машин число бойков может быть различным: два, три, четыре [39].

Исходные заготовки валов поступают в механический цех в нормализованном состоянии с твердостью 190…270 НВ. Поверхности исходных заготовок очищаются от окалины путем травления или с использованием других методов подготовки валов для обработки.

Перечисленные особенности валов ГТД и способы получения исходных заготовок в машиностроительном производстве выбираются исходя из экономической целесообразности. Степень приближения формы исходной заготовки к форме готовой детали определяет основные пути и этапы обработки валов в механическом производстве.

5.2.1. Маршрутная технология изготовления валов

Принципиальная особенность изготовления валов в механическом производстве отражается в определенной последовательности обработки поверхностей: *вначале производится обработка отверстия, а затем выполняется наружный контур вала.* Это позволяет уменьшать возможную погрешность расположения внутреннего и наружного контуров заготовки относительно друг друга.

Процесс обработки валов условно разбивается на несколько этапов. В каждом из них этапов выполняется приведенная выше последовательность обработки.

На первом этапе изготовления вала ротора никого давления ГТД, принята такая последовательность обработки:

1) создаются базовые установочные поверхности для обработки вала, которыми являются цилиндрические наружные пояски и торцевые поверхности;

2) на подготовленных базовых установочных поверхностях осуществляется основная обработка внутренней полости вала. Создаются базовые установочные поверхности для дальнейшей обработки наружного контура вала. Это, как правило, центровые фаски или специальные расточенные пояски. При подготовке таких базовых поверхностей их строго ориентируют относительно внутреннего контура вала;

3) производится обработка наружного контура вала на подготовленных базовых фасках.

В конце этого этапа технологического процесса вновь осуществляется подготовка базовых установочных поверхностей на наружном контуре заготовки для качественного проведения следующего этапа технологического процесса.

Такая последовательность обработки принята для всех этапов технологического процесса изготовления валов. *При этом учитываются возможные смещения («уводы») при обработке внутренних поверхностей валов, которые можно устранить на последующих операциях технологического процесса, а обработка наружных поверхностей вала осуществляется на подготовленных базах, которые имеют минимальное смещение относительно внутреннего контура.*

Рассмотрим технологический процесс изготовления термоулучшаемых валов. К таким валам можно отнести вал ротора низкого давления (НД) (см. рис. 5.2). Технологический процесс изготовления ротора низкого давления ГТД можно условно разделить на следующие основные этапы:

1) получение исходной заготовки вала методом штамповки на КГШП;

2) предварительная обработка вала на высокопроизводительном токарном оборудовании;

3) термическая обработка;

4) получистовая обработка основных поверхностей вала;

5) чистовая обработка основных поверхностей вала;

6) окончательная, отделочная обработка вала.

5.2.2. Получение исходной заготовки вала ротора низкого давления

Исходную заготовку получают методом горячего деформирования на горячештамповочном прессе. На рис. 5.4 представлен эскиз заготовки вала. Допуски на диаметральные размеры исходной заготовки обеспечиваются в пределах 7…10 мм. Линейные размеры имеют отклонения от 10 до 15 мм. Внутреннее отверстие, диаметром 79 мм может иметь отклонение от формы в продольном направлении до 10 мм. Максимальный размер при этом составляет 91 мм.

При проектировании исходной заготовки ставилась задача создания минимального припуска по контуру готовой детали. Это позволяет уменьшить трудоемкость на механическую обработку вала, особенно для труднообрабатываемого глубокого отверстия. Наружный штамповочный уклон у фланца заготовки 7°, а угол внутреннего конуса 20°. Радиусы переходов образующих поверхностей выполняются в пределах 3…5 мм.

Вал ротора НД является ответственным элементом ГТД и выполняется по первой группе контроля. Механические свойства материала проверяются у каждого вала. В связи с этим для каждой исходной заготовки предусматривается изготовление специального технологического кольцевого образца, который расположен на фланце исходной заготовки (рис. 5.4). На первом этапе технологического процесса механической обработки данный образец вырезается и направляется в лабораторию для анализа качественных показателей материала. Заключение по качеству материала исходной заготовки определяет возможность дальнейшей обработки вала.

5.2.3. Механическая обработка вала ротора низкого давления

Исходная заготовка вала ротора НД имеет относительно небольшие припуски на механическую обработку. Это позволяет процесс механической обработки условно разделить на четыре основные части.

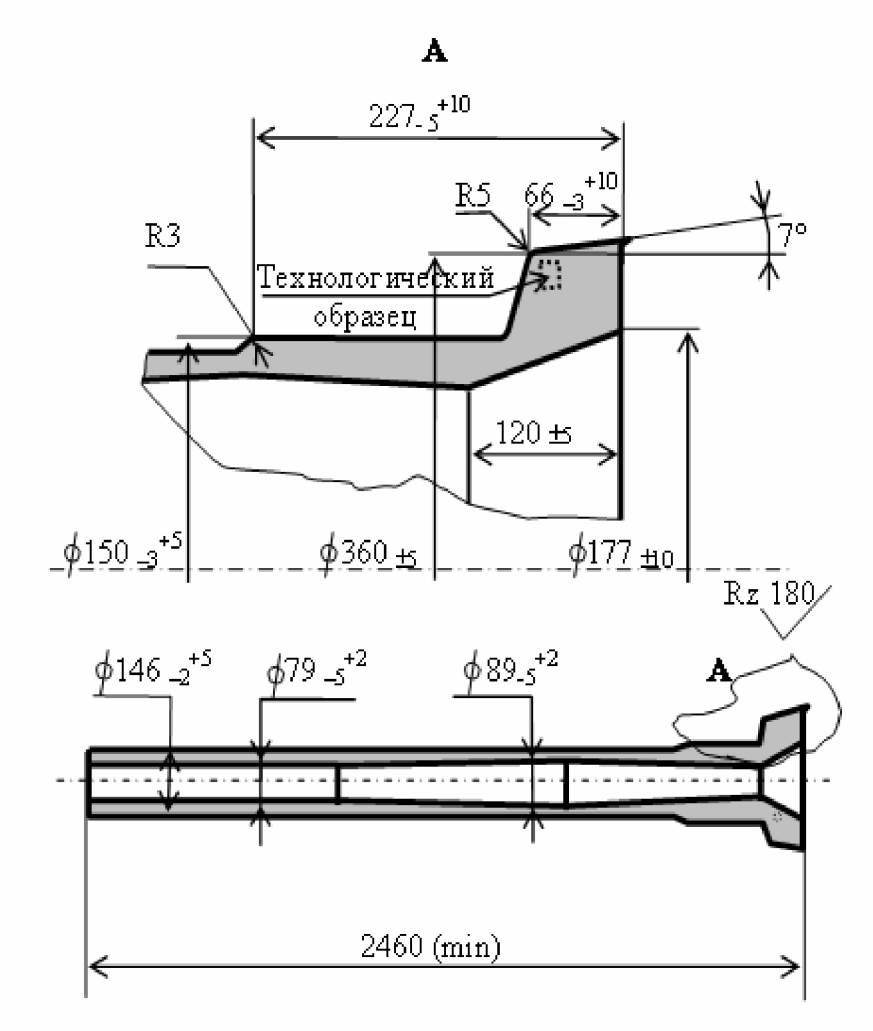


Рис. 5.4. Исходная заготовка вала ротора низкого давления ГТД

В первой части технологического процесса (операции №10 – 40) обеспечивается формирование предварительного контура заготовки на токарном высокопроизводительном оборудовании. Первую часть технологического процесса можно разделить на три основных этапа:

первый этап (операции № 10 – 15) – обработка внутренней полости вала на токарных станках и подготовка технологических баз для следующего этапа;

второй этап (операции №20 – 30) – формирование наружного контура вала. Эти операции выполняются на подготовленных базах методом токарной обработки;

третий этап (операции №35 – 40) – снятие внутренних напряжений методом термической обработки и подготовка базовых поверхностей для проведения качественной обработки в следующей части технологического процесса.

Во второй части технологического процесса (операции №45 –115) выполняется получистовая обработка основных поверхностей вала и формируется профиль вала, близкий к профилю готовой детали. Важной задачей этой части технологического процесса является обеспечение точного расположения поверхностей вала относительно друг друга и подготавливаемых базовых поверхностей. В этой части технологического процесса осуществляется также контроль качества выполнения основных параметров заготовок.

В третьей части технологического процесса (операции №120 – 175) обеспечиваются качественные показатели вала для основных поверхностей. Данные операции выполняются на высокоточном токарном и шлифовальном оборудовании. Большое внимание в этой части технологического процесса уделяется созданию и поддержанию в хорошем состоянии базовых технологических поверхностей.

В четвертой части технологического процесса (операции №180 – 335) методами окончательной доводки формируются параметры рабочих и конструкторских поверхностей. В этой части технологического процесса осуществляется отделка и окончательный контроль вала ротора ГТД.

План механической обработки исходной заготовки имеет следующую последовательность.

Первая часть

№5. Штамповка.

№10–15. Предварительная токарная обработка внутреннего контура вала.

№20–30. Предварительная токарная обработка наружного контура вала.

№35-40. Подготовка и контроль базовых поверхностей.

Вторая часть.

№45–80. Получистовая расточка внутреннего контура вала, снятие напряжений, контроль и подготовка базовых поверхностей.

№85–100. Чистовая токарная обработка «стебля» вала и подготовка наружных базовых поверхностей.

Третья часть.

№ 105–115. Окончательная токарная обработка фланца и внутреннего контура.

№ 120–125. Шлифование внутренних цилиндрических поверхностей.

№130. Полирование внутреннего контура и конуса вала.

№ 135–140. Промывка и контроль качественных показателей.

№ 145–150. Алмазное выглаживание внутренних поверхностей вала.

№155. Окончательная обработка наружного профиля вала.

№ 160. Обработка отверстий во фланце.

№ 165–175. Проточка лабиринтных уплотнений и канавок. Шлифование наружных базовых поверхностей. Контроль качественных показателей вала.

Четвертая часть.

№ 180–195. Обработка технологического образца, его монтаж на валу, долбление и шлифование шлиц на образце.

№ 200–215. Обработка шлиц на валу.

№220 Слесарная обработка вала.

№ 225 Контроль.

№ 230–240. Дробеструйная обработка и доводка поверхностей шлиц.

№ 245–270. Фрезерование небольших выемок и обработка впадин и отверстий методом сверления и зенкерования.

№275. Слесарная обработка.

№ 280–290. Магнитный контроль материала вала.

№295–310. Снятие внутренних напряжений и доработка вала в случае необходимости.

№ 315–335. Окончательный контроль качественных показателей вала.

Рассмотрим выполнение отдельных операций технологического процесса изготовления валов ГТД.

Первая часть технологического процесса механической обработки (рис. 5.5) предусматривает предварительную, грубую обработку

вала. *На операции* №10 исходная заготовка устанавливается на токарный станок типа 1D63 по подготовленным наружным базовым поверхностям с помощью роликовых люнетов, ориентируется в осевом направлении по малому торцу вала и приводится в движение четырехкулачковым патроном. На этой операции производится расточка внутреннего контура, формируются цилиндрические пояски и конусные образующие. В процессе обработки удаляются значительные припуски. Удаление припусков проводится в несколько проходов. Обработка осуществляется при скорости резания v = 60…70 м/мин., продольная подача при этом S_o = 0,6 мм/об. Для растачивания отверстий используются прямые расточные резцы со следующими основными геометрическими параметрами: $\varphi = 45°$; $\varphi_1 = 45°$; $\gamma = 12°$; $\alpha = 10°$; $\lambda = 2°$. Радиус у вершины резца r = 1 мм. Сечение державки резца равно 25×25 мм.

Резцы устанавливаются и закрепляются в специально оправе (бор штанге). Отверстие диаметром 258+0,6 мм и торец фланца на этой операции готовятся как базы для последующей обработки.

На операции №15 заготовка устанавливается в трехкулачковый патрон по расточенному пояску диаметром 258+0,6 мм и ориентируется в осевом направлении по торцу фланца вала. Другой конец вала устанавливается в технологической системе с помощью роликового люнета, который неподвижно закреплен на станине станка. На данной операции производится расточка отверстия в «стебле» вала. Диаметр отверстия равен 86 мм, а длина расточки более 1000 мм. При обработке отверстия удаляемый припуск неравномерный, что определяется особенностью изготовления исходной заготовки. В отдельных случаях эта неравномерность припуска может проявиться, как «чернота» в средней части обрабатываемого отверстия.

При выполнении этой операции осуществляется также подготовка базовой установочной фаски, которая растачивается под углом 30°. Расточка производится при малых режимах обработки с целью обеспечения высокого качества поверхности фаски. Важным условием при расточке фаски является обеспечение совмещения оси фаски с осью отверстия диаметром 86 мм, а также созданием формы фаски с минимальным отклонением от номинальных значений.

Последующие операции № 20 и 25 выполняются на подготовленных базовых установочных поверхностях и предусматривают обработку наружного контура.

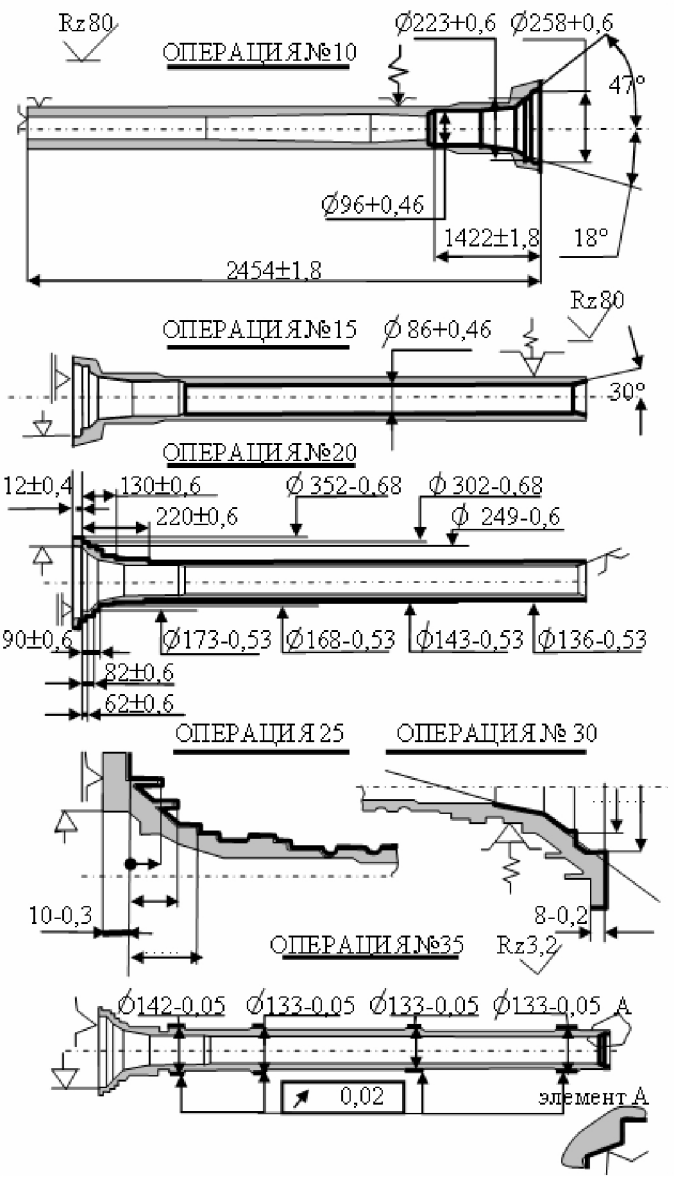


Рис. 5.5. Предварительный этап обработки вала

На операции №20 удаляется основной припуск, осуществляется вырезка технологических образцов (см. рис. 5.3). Припуск при обработке различных поверхностей колеблется в значительных пределах и удаляется за несколько проходов.

Простановка операционных размеров в операциях технологического процесса предусматривает возможность их выполнения на настроенном станке в полуавтоматическом режиме. Один размер (12±0,4 мм) задается относительно установочной базы, а остальные – обеспечивают внутрикомплексную размерную связь обрабатываемых поверхностей. Операция №20 проводится на высокопроизводительном токарном станке 1Д63. Скорость резания – v = 60 м/мин, продольная подача S_o = 0,6 мм/об. При обработке достигается шероховатость поверхностей до Rz80. Допуски на линейные размеры выполняются в пределах 1,2 мм, а на диаметральные размеры – от 0,53 до 0,68 мм.

Операция №25 выполняется после контроля качества выполняется на высокопроизводительном токарном станке мод. V-800NC «BOEHRINGER». На этой операции производится проточка наружного контура вала, выполняется предварительное формирование канавок, выступов, лабиринтных полок и других важных элементов конструкции.

На этой операции заготовка устанавливается по подготовленным ранее базовым поверхностям. После проточки пояска на наружной поверхности, который строго согласуется с установочной фаской, производится дополнительная установка вала по люнету. Такой способ ориентирования заготовки в технологической системе позволяет обеспечить надежность обработки поверхностей вала в данной операции технологического процесса.

На операции №30 заготовка устанавливается по двум цилиндрическим поверхностям, подготовленным под люнеты. Эти поверхности строго ориентируют заготовку в технологической системе. После установки заготовки производится проверка ее положения. Допустимое биение при установке не должно превышать 0,03 мм. На данной операции производится предварительная обработка большого фланца вала и входного контура отверстия со стороны фланца. В этой части технологического процесса уменьшается припуск на последующую обработку и создается его равномерное расположение относительно друг друга. Скорость резания при обработке v = 60 м/мин, а продольная подача S_o = 0,2 мм/об. Шероховатость обрабатываемых поверхностей при этом равна *Rz* 20.

Операции №35 и 40 (контроль базовых поверхностей) выполняются с целью создания точных установочных поверхностей для дальнейшего проведения комплекса операций по повышению качественных показателей заготовки. При этом производится чистовая проточка цилиндрических поясков с точностью 0,05 мм, обеспечивается их биение относительно друг друга и расточенного пояска в отверстии не более 0,02 мм.

Шероховатость на базовых поясках выполняется не ниже *Ra* 3,2. Полученные параметры тщательно проверяются на контрольно-измерительных приборах.

Таким образом при обработке исходной заготовки вала в первой части технологического процесса выполнены следующие работы:

1) проведена основная предварительная обработка внутреннего и наружного контура заготовки, сняты внутренние напряжения термической обработкой и проверено качество материала в соответствии с первой группы контроля;

2) обеспечено равномерное распределение припуска по образующим поверхностям на дальнейшую обработку заготовок.

3) подготовлены технологические установочные поверхности (базы) для качественного проведения дальнейшей обработки валов.

Вторая часть (рис. 5.6) **технологического процесса изготовления валов** (*операции №45–100*) предусматривает постепенное повышение точности на операциях и приближение контура заготовки к контуру готовой детали. В этой части технологического процесса предусматривается также снятие внутренних напряжений, полученных на предшествующих этапах обработки и тщательный контроль изменения геометрических параметров заготовок. Важным условием для устранения возможных короблений заготовок при термической обработкой является вертикальное положение вала в процессе проведения этой операции.

Обновление базовых установочных поверхностей (поясков и фасок) тщательно контролируется, а погрешности устраняются за счет выверки и доработки установочных элементов вала.

После проведения проточки наружных цилиндрических базовых поверхностей (операции № 65) и контроля качества исполнения этих поверхностей проводится чистовое растачивание глубокого отверстия с помощью расточной головки.

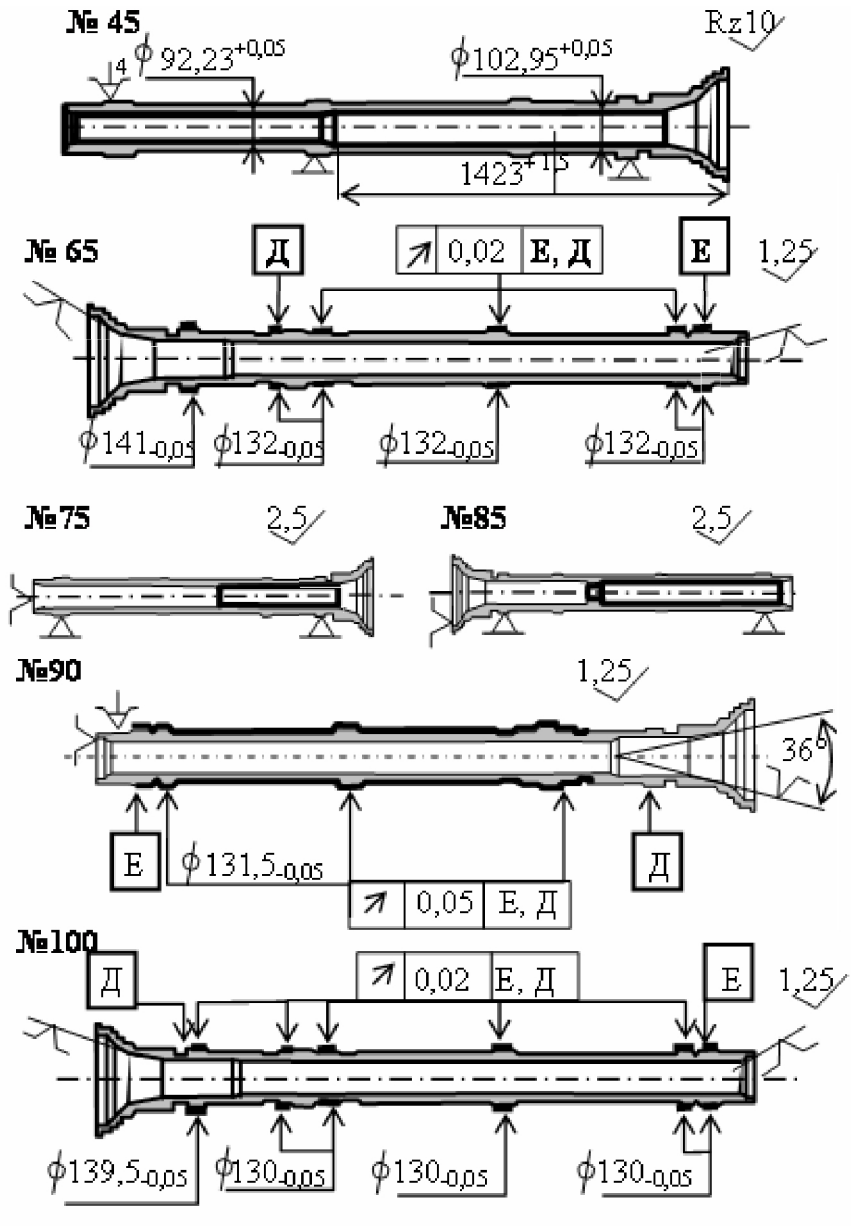


Рис. 5.6. Получистовой этап обработки вала

Операция № 75 – расточка отверстия, выполняется на высокоточном токарном станке В-630 «BOERINGER». Заготовку, установленную в роликовые люнеты и выверенную по наружной цилиндрической поверхности до 0,02 мм, приводит в движение четырехкулачковый патрон. Резцовая головка получает строгое направление относительно специальной направляющей системы станка. Эта система позволяет обеспечить минимальное смещение оси растачиваемого отверстия относительно номинального положения. При глубине расточки 1426+1,5 мм биение отверстия относительно установочных поверхностей не превышает 0,05 мм. Диаметр растачиваемого отверстия при этом обеспечивается 107,95+0,05 мм. Шероховатость поверхности составляет *Rz*20.

После установки, контроля и проверки положения базовых поверхностей производится обработка отверстия диаметром 95,95+0,05 мм с противоположной стороны вала (операция №85). При выполнении этой операции заготовка также устанавливается в роликовые люнеты и приводится в движении от шпинделя станка с помощью четырехкулачкового патрона. В процессе установки заготовки в технологической системе контролируется ее положение. Биение не должно превышать 0,02 мм.

Операции №90 и 100 предусматривают получистовую обработку наружного контура и создание базовых установочных поверхностей для чистового этапа обработки валов.

Весьма ответственными операциями при обработке внутренней полости вала являются расточки глубоких отверстий (операция №45, 75, 85) с помощью расточных головок. От качества выполнения этих операций во многом зависит работоспособность роторной части ГТД. При расточке необходимо обеспечивать размер отверстия и точность расположения его относительно базовых установочных поверхностей. Смещение обрабатываемого отверстия относительно номинального положения на предварительных операциях приводит к увеличению припуска на окончательную обработку вала, а повышенное смещение растачиваемого отверстия на окончательных операциях технологического процесса – к появлению неуравновешенности элементов вала относительно конструкторских базовых поверхностей.

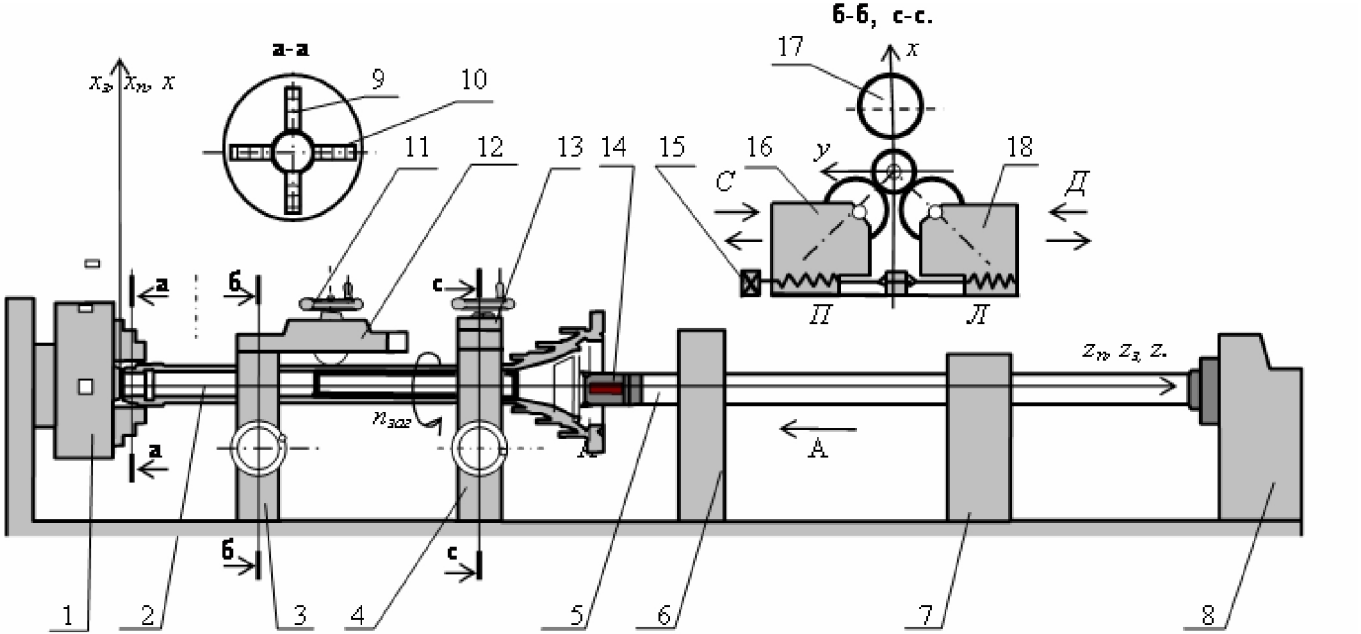


Рис. 5.7. Схема расточки отверстия со стороны фланца вала (операция №45)

Операции №45 – расточка центрального отверстия со стороны фланца вала выполняется на токарном станке В-630 мод. «BOERINGER» (рис. 5.7). Заготовка вала *2* устанавливается в технологической системе станка по двум базовым сечениям (*б-б, с-с*) на подвижные люнеты. Базирование осуществляется на два вращающихся ролика, которые размещены в подвижных башмаках *16* и *18* люнета. При наладке операции эти башмаки сводятся к центру за счет вращения винта *15*, обеспечивая центрирование заготовки относительно шпинделя станка и патрона *1*. Верхний прижимной ролик *17* подводится к заготовке для фиксации положения с помощью рукоятки *11*. Прижим заготовки к вращающимся роликам выполняется после поворота в поперечном направлении планки *12* и закрепления ее на люнете фиксатором *13*. Установка вала в технологической системе должна обеспечивать строгое расположение его в поперечном направлении относительно оси вращения шпинделя станка и оси борштанги *5*.

После установки вала в люнеты производится контроль положения его в технологической системе. *На предварительной операции (операция №45) допустимое биение составляет 0,05 мм., а на получистовых операциях (операции №75, 85) биение должно быть не более 0,02 мм.*

После проверки заданных условий по расположению вала в поперечном направлении с помощью индикаторных часов производится подвод кулачков *9* и *10* четырехкулачкового патрона *1* и надежное закрепление заготовки. Важным условием при закреплении заготовки является фиксация ее без искажения ее начального положения.

Шпиндель станка обеспечивает вращение ($n_{заг.}$). Борштанга *5*, установленная в направляющих *6-8* станка, осуществляет плавное перемещение резцовой головки *14* в продольном направлении (стрелка *А*). Это движение обеспечивается специальной гидравлической системой станка.

Таким образом, во второй части технологического процесса выполнены следующие работы:

1) проведена получистовая обработка вала и повышена точность основных поверхностей;

2) окончательно сформированы геометрические параметры для основных свободных поверхностей вала;

3) обеспечено точное расположение поверхностей вала относительно технологических базовых установочных поверхностей;

4) подготовлены базовые установочные поверхности для дальнейшей обработки:

– для обработки наружного контура подготовлены центровые фаски и внутренние цилиндрические пояски;

– для обработки внутреннего контура подготовлены наружные цилиндрические пояски для люнетов.

Третья часть технологического процесса (операции №105–175) предусматривает чистовую обработку ответственных поверхностей вала на токарных и шлифовальных станках (рис. 5.8). В этой части технологического процесса проводятся операции по обработке сложнофасонных поверхностей высокой точности, формируются лабиринтные уплотнения, обеспечивается повышение качества поверхностей вала за счет выглаживания, полирования и других технологических методов.

Операция №105 предусматривает окончательную токарную обработку большого фланца вала и конической образующей внутреннего контура.

На операциях № 110–115 осуществляется вторичная расточка отверстия вала со стороны фланца. Обработка выполняется расточной головкой на токарном станке В-630 «BERINGER». При расточке диаметр отверстия увеличивается до 108,7+0,054 мм.

Операции № 120–150 предусматривают окончательную обработку внутренней полости вала: производится шлифование, алмазное выглаживание и полирование внутреннего контура. При этом улучшается качественное состояние поверхностного слоя и обеспечивается повышение ресурса работы валов при эксплуатации.

Расположение внутреннего контура вала относительно базовых технологических поверхностей на этих операциях обеспечивается с высокой точностью. Смещение внутреннего контура вала относительно номинального положения не должно превышать 0,025 мм. Такая характеристика точности позволяет обеспечивать минимальное смешение масс элементов вала относительно оси вращения при эксплуатации и улучшать условия сбалансированности роторной части ГТД.

На операции № 155 проводится окончательная токарная обработка основных поверхностей наружного контура вала. Смещение наружного контура вала относительно номинального положения выполняется в пределах от 0 до 0,02 мм.

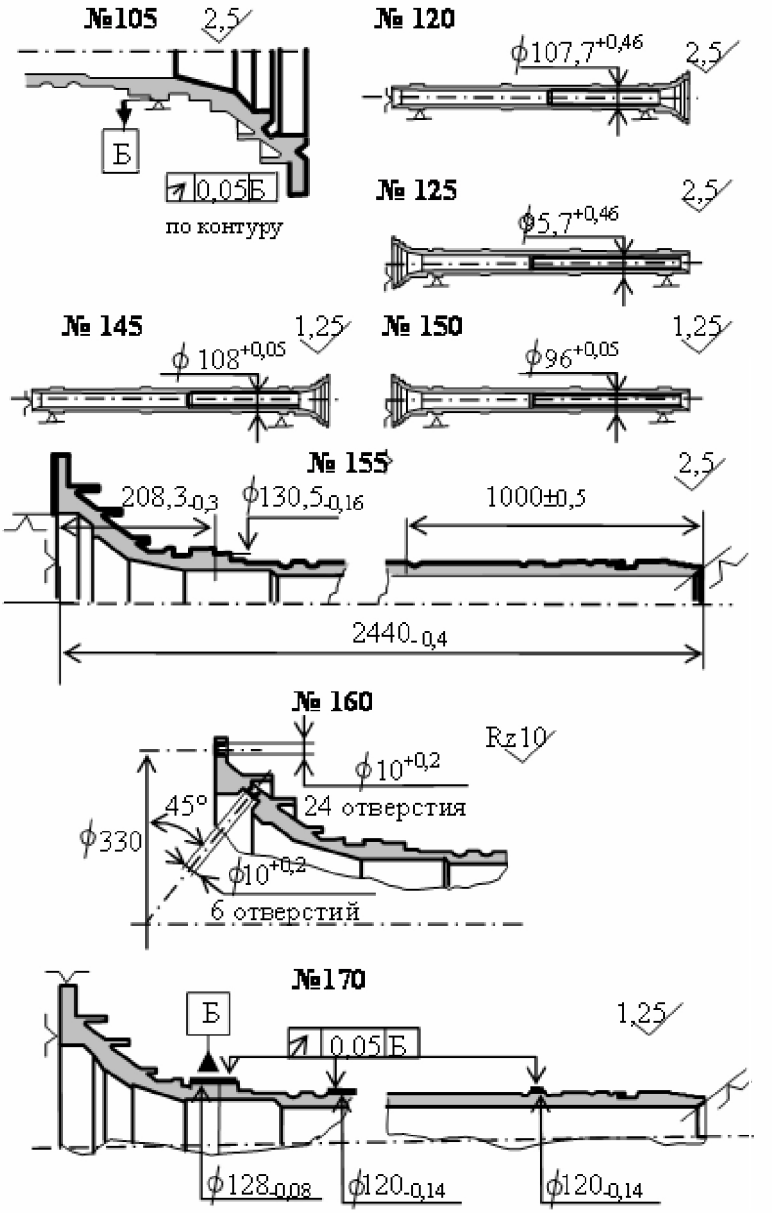


Рис. 5.8. Чистовой этап обработки вала

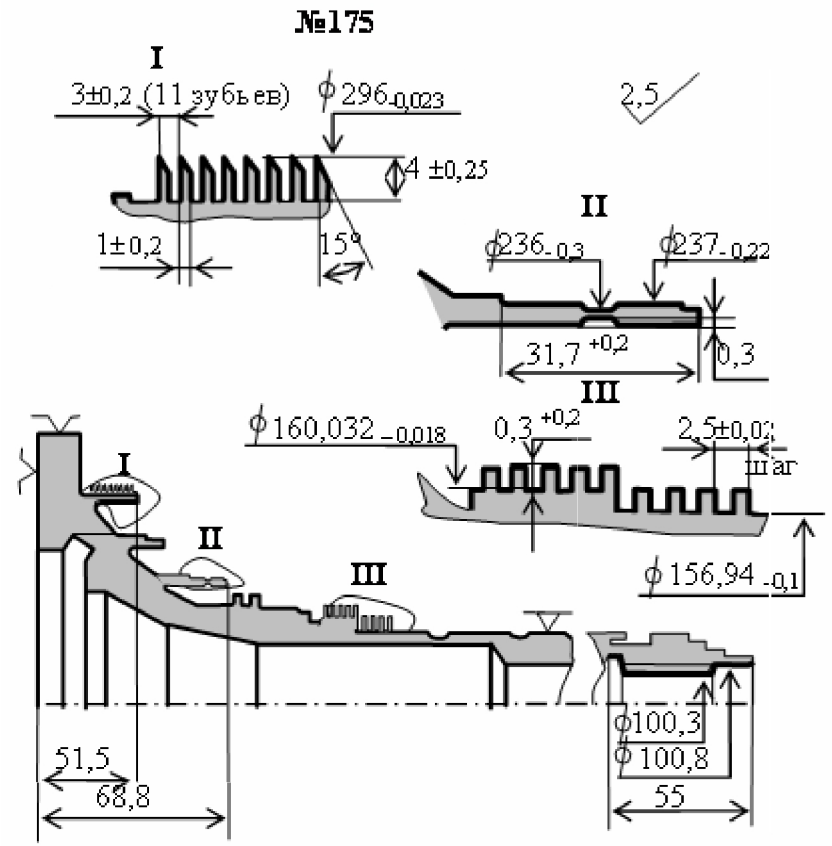


Рис.5.9. Чистовая проточка лабиринтов, нарезка резьб и подготовка базовых поверхностей для окончательной обработки вала

На операции №160 производится обработка отверстий во фланце, на конусной образующей и на стебле вала на радиально сверлильном станке.

Операции 165–175 предусматривают формирование методом токарной обработки и шлифования основных конструкторских и рабочих поверхностей вала. На этих операциях изготавливаются высокоточные поверхности лабиринтных контуров, резьб, фасонных канавок и других точных элементов вала.

Операции № 175 – проточка лабиринтов и нарезка резьбы выполняется на токарном станке мод. 1М63 (рис. 5.9). Заготовка устанавливается в технологической системе по наружной образующей и торцу фланца в специальную центрирующую планшайбу. Дополнительное ориентирование осуществляется по роликам неподвижного люнета на конце стебля вала. После установки вала производится контроль возможного его смещения в технологической системе. Это смещение контролируют по специальным пояскам. Биение не должно превышать 0,01 мм. На данной операции производится окончательное формирование лабиринтного профиля, элементов установки и закрепления подшипниковой группы, выполняется подготовка установочной поверхности для обработки шлицов и обрабатываются другие важные элементы вала.

Четвертая часть технологического процесса изготовления вала является завершающим этапом механической обработки. В этой части процесса окончательно формируются показатели основных рабочих поверхностей вала. Производится отделка поверхностей и обрабатываются мелкие выемки, пазы, отверстия и другие элементы.

На операциях №180–195 выполняются шлицы в отверстии вала со стороны «стебля», соединяющие турбину низкого давления с ротором компрессора. От качества этого соединения зависит работоспособность ГТД. Перед выполнением данных операций производится подготовка специального технологического образца, который устанавливается в вал по подготовленному пояску и закрепляется. Технологический образец выполняется с высокой точностью методом токарного точения и шлифования. Установочные элементы образца выполняются с точностью 0,01…0,018 мм. После установки и проверки положения вала и образца в технологической системе производится долбление шлиц на образце на горизонтально-долбежном станке «Felloy».

Число зубьев шлицев 50, модуль 2,5 мм, толщина зуба – 4,171…0,06 мм, блочный размер при этом соответствует 63,884…0,052. При долблении технологического образца обеспечивается шероховатость поверхности Ra = 2,5 мкм. Последующее шлифование шлицев на образце осуществляется на станке с ЧПУ мод. RS – 2003. При этом толщина зуба шлицевого элемента 3,88…0,04 мм, блочный размер 63,593…0,035 мм, шероховатость поверхности Ra = 1,25 мкм.

После тщательной проверки правильности выполнения технологического образца и точности расположения шлицевого венца (смещение не более 0,02 мм) относительно номинального положения производится

обработка рабочих шлицов на валу в два приема. Вначале производится долбление, а затем шлифование шлицев.

Перед проверкой качественных показателей шлицевого венца производится слесарная обработка острых кромок по всему контуру зубчатого венца.

На операциях № 230–235 производится обдувка шлицев дробью на специальной установке мод. ПДК-В127. Эти операции предусматривают настройку и проверку дробеструйной установки, проверку качества полученного поверхностного слоя технологического образца и выполнение операции на «рабочем» валу. При выполнении операции осуществляется контроль веса «закладки» рабочих роликов в камеру, размеры роликов (диаметр 1,6 ± 0,15 мм) и время обработки (20 мин ± 15').

Операции № 240–255 – окончательная доводка методом притирки отдельных элементов шлицев, фрезерование выемок в пазах, проточка мелких выемок и фрезерование малых торцевых пазов. Эти операции выполняются на универсальных станках с использованием стандартных и специальных инструментов.

Операции № 260–270 проводятся для окончательной обработки отверстий во фланце, отверстий для подвода масла к рабочим элементам вала и для притупления острых кромок в отверстиях. Отверстия во фланце, служащие для установки призонных болтов, подвергаются развертыванию (диаметр 12,016 + 0,026 мм).

После окончательной слесарной обработки и промывки (операции №275–280) вал поступает на контроль.

Операции № 285–290 предусматривают намагничивание детали и магнитный контроль. Такой контроль позволяет выявлять наружные дефекты на поверхностях вала.

Операция №295 – контроль после промывки и сушки вала. Эта операция предусматривает проверку всех сопроводительных документов на вал, контроль качества поверхностей.

Операции №300–315 – снятие внутренних напряжений и выполнение, по мере необходимости, шлифования «стебля» вала.

Операции № 320–335 – проверка геометрических параметров вала. После этого вал поступает на сборку.

5.3. ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВАЛОВ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Изготовление валов из низкоуглеродистых сталей (18ХН3А, 12ХН3А, 15Х12Н2МВФАБ и др.), которые подвергаются термохимическому улучшению в виде цементации рабочих и конструкторских поверхностей, отличается от технологических процессов получения термоулучшеных валов, рассмотренных выше, дополнительными этапами обработки.

Весь технологический процесс изготовления валов такого типа можно условно разделить на следующие основные этапы:

1) получение исходной заготовки вала методом штамповки на КГШП;

2) предварительная обработка на высокопроизводительном токарном оборудовании;

3) получистовая обработка и подготовка поверхностей под термохимические операции;

4) проведение термохимической операции;

5) термическая операция (закалка, отпуск);

6) восстановление базовых установочных поверхностей;

7) чистовая обработка основных поверхностей;

8) окончательная, отделочная обработка.

В представленном технологическом процессе выделены пять этапов (этапы 3–7), обеспечивающие выполнение основных показателей качества цементационного слоя. На них формируется размер глубины цементационного слоя *Ц* и заданные значения твердости на образующих поверхностях шеек вала.

Рассмотрим процесс формирования основных показателей качества (глубины цементации *Ц* и твердости HRC) на шейках вала.

На рис. 5.10 представлена комплексная схема размерных связей расположения цементируемой шейки вала в технологическом процессе для выделенных 3–7 этапов обработки.

На *третьем этапе* производится операция для цилиндрической шейки вала методом токарной или шлифовальной обработки. На этой операции обеспечивается диаметр *Д* шейки вала и расположение $\rho 4$ ее относительно базовой установочной фаски.

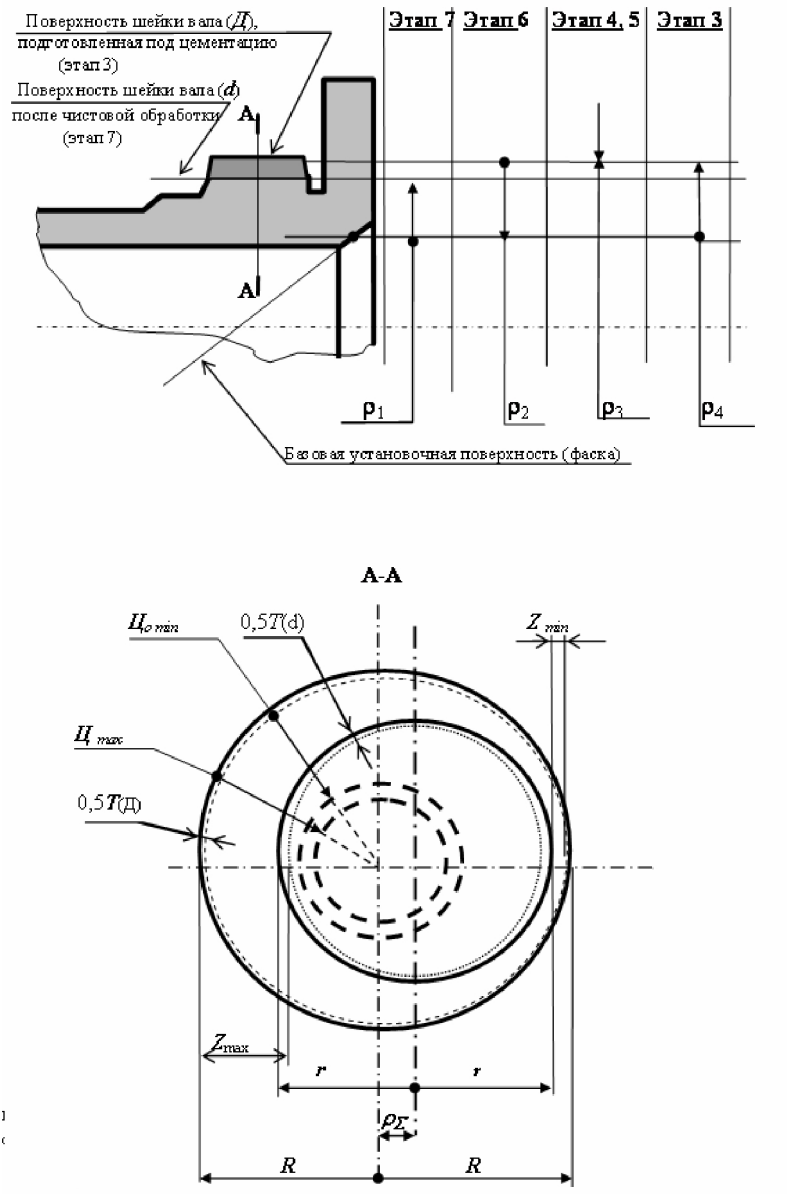


Рис. 5.10. Комплексная схема размерных связей для шейки вала

При проведении *этапов 4 и 5* осуществляется насыщение поверхностного слоя шейки вала углеродом в процессе цементации и создается необходимая твердость за счет проведения закалки и последующего отпуска.

Глубина цементации выполняется больше, чем необходимо иметь у готовой детали, так как часть слоя металла удаляется при чистовой обработке поверхности вала (этап 7).

При формировании глубины цементации $Ц_о$ на операции (этап 4) и последующей термической обработке (этап 5) происходят изменения геометрических параметров вала, обусловленные короблением вала от термического воздействия. В комплексной схеме размерных связей это изменение показано параметром ρ_3.

На этапе 6 технологического процесса производится восстановление базовых установочных поверхностей (фасок) вала. Операция предусматривает уменьшение смещения образующей поверхности $Д$ шейки вала относительно базовой установочной поверхности (фаски); выполняется методом токарной обработки фаски и последующего контроля возможного смещения ρ_2. В отдельных случаях для достижения высокой точности расположения поверхностей используют даже шабровку фасок или другие технологические приемы, улучшающие точность расположения поверхности $Д$ относительно фаски.

Этап 7 предусматривает окончательную обработку шеек вала методом шлифования. На операциях этого этапа обеспечивается диаметр d и расположение ρ_1 шейки вала относительно базовой поверхности.

Таким образом, в формировании глубины цементационного слоя $Ц$ и, соответственно, твердости HRC участвуют все перечисленные операции технологического процесса на данных этапах обработки.

В сечении А-А шейки вала представлены размеры, которые позволяют оценить удаляемый припуск Z при обработке вала на чистовом этапе (этап 7). Величины удаляемых припусков Z_{max} или Z_{min} в партии деталей определяют возможную глубину цементации и ее неравномерность на шейках валов. Этот показатель соответственно влияет на величину твердости на образующей поверхности.

На основании комплексной схемы размерных связей и заданных значений составляющих звеньев для всех этапов обработки шейки вала общее уравнение размерной цепи удаляемого припуска Z при чистовой обработке (этап 7):

$$Z - R \pm \rho_{\Sigma} + r = 0.$$

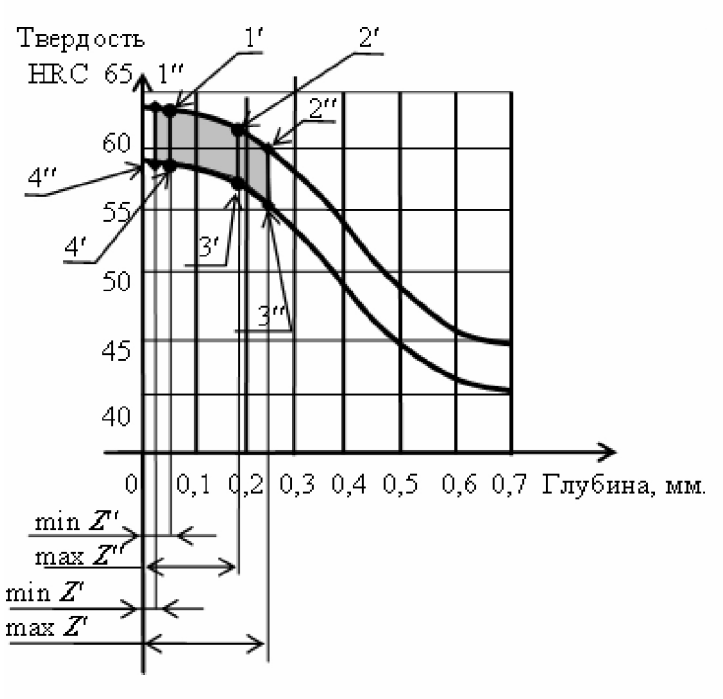


Рис. 5.11.Изменение глубины и твердости на цементированной цилиндрической шейке вала в зависимости от принятого технологического процесса

Тогда уравнение замыкающего звена:

$$Z = R \pm \rho_{\Sigma} - r.$$

В данном уравнении вектор ρ_{Σ} определяет суммарное смещение обрабатываемых поверхностей шейки вала относительно друг друга. Сумма возможных смещений ρ_{Σ} зависит от использования в технологическом процессе приведенных выше этапов обработки.

Необходимо отметить, что в нашем случае величина составляющих векторов ρ_i для различных этапов обработки определяется модулем вектора $|\rho_i|$ и углом φ_i. Модуль вектора $|\rho_i|$ колеблется от минимального (равного нулю) до максимального (равного 0,5 заданного биения шейки вала на операции). Угол, определяющий расположение модуля вектора в поперечном сечении изменяется от 0 до 2π.

Тогда:

$$Z_{min} = R_{min} - \rho_{\Sigma max} - r_{max},$$
$$Z_{max} = R_{max} + \rho_{\Sigma max} - r_{min}.$$

В зависимости от величины удаляемого припуска при шлифовании шейки вала (этап 7) будет создаваться глубина цементационного слоя на валу.

Таким образом:

$$Ц_о - Ц - Z = 0,$$

тогда

$$Ц = Ц_о - Z,$$

или

$$Ц_{max} = Ц_{omax} - Z_{min},$$
$$Ц_{min} = Ц_{omin} - Z_{max}.$$

Твердость на поверхности цементированного слоя шейки вала будет изменяться в зависимости от удаляемого припуска Z при окончательном шлифовании (этап 7). На рис. 5.11 показано изменение твердости HRC на поверхности в зависимости от величины удаляемого слоя металла при окончательной обработке. По оси ординат отложены значения возможной твердости HRC как на поверхности I шейки вала, так и в поверхностном слое II.

В партии валов после проведения цементации, закалки и отпуска (этапы 4 и 5) твердость шейки будет иметь возможные максимальные или минимальные значения. Кривые изменения твердости по глубине слоя металла у шейки вала формируют область Q рассеивания значений в партии обрабатываемых валов. Эта область характеризуется возможными максимальными и минимальными значениями твердости (точки 1 и 4) на поверхности шейки.

Необходимо отметить, что на одной шейке вала может быть получена разная твердость. Это различие значений обусловливает неравномерность твердости по образующей окружности поверхности шейки вала.

Пример 5.1. Формирование качественных показателей цементируемой поверхности шейки вала.

Даны чертежные значения цементационного слоя: глубина цементации $Ц$ на образующей шейки вала $Ц = 0{,}6…0{,}9$ мм.

Необходимо обеспечить твердость на поверхности шейки вала не ниже 55HRC.

Из технологического процесса известны операционные размеры:

1) $Д = 50{,}3 - 0{,}05$ мм, $R = 25{,}15 - 0{,}025$ мм;

2) $Д = 50 – 0{,}02$ мм, $r = 25 – 0{,}01$ мм;

3) $Ц_о = 0{,}8 – 1{,}0$ мм;

4) $\rho_1 = 0 + 0{,}01$ мм (допустимое биение $б_1 = \omega б_1 = 0{,}02$ мм);

5) $\rho_2 = 0 + 0{,}02$ мм (допустимое биение $б_2 = \omega б_2 = 0{,}04$ мм);

6) $\rho_3 = 0 + 0{,}05$ мм (возможное коробление $б_3 = \omega б_3 = 0{,}1$ мм);

7) $\rho_4 = 0 + 0{,}02$ мм (допустимое биение $б_4 = \omega б_4 = 0{,}04$ мм).

На основании представленных значений определим возможно предельные значения удаляемого припуска Z, возможную расчетную глубину цементационного слоя $Ц$ и ожидаемую предельную твердость на поверхности шейки вала.

Вариант 1.

1. Примем условие: в технологическом процессе имеет место этап 6 – восстановление базовой поверхности (фаски).

Тогда:

$$\rho_{\Sigma 1} = \rho_1 + \rho_2.$$

2. Определим удаляемый припуск при чистовой обработке шейки вала:

$$Z = R \pm \rho_{\Sigma 1} – r;$$

$$Z_{min} = R_{min} – \rho_{1max} – \rho_{2max} – r_{max};$$

$$Z_{min} = 25{,}125 – 0{,}01 – 0{,}02 – 25 = 0{,}095 \text{ мм};$$

$$Z_{max} = R_{max} + \rho_{1max} + \rho_{2max} – r_{min};$$

$$Z_{max} = 25{,}15 + 0{,}01 + 0{,}03 – 24{,}99 = 0{,}19 \text{ мм}.$$

Таким образом припуск, удаляемый с одной стороны цилиндрической поверхности шейки в партии обрабатываемых валов, составит от 0,095 мм до 0,19 мм, т.е. неравномерность удаляемого припуска ω_z в партии обрабатываемых валов составит 0,095 мм.

3. Определим возможную предельную глубину цементационного слоя на поверхности вала:

$$Ц = Ц_о – Z;$$

$$Ц_{max} = Ц_{omax} – Z_{min};$$

$$Ц_{max} = 1{,}0 – 0{,}095 = 0{,}905 \text{ мм};$$

$$Ц_{min} = Ц_{omin} – Z_{max};$$

$$Ц_{min} = 0{,}8 – 0{,}19 = 0{,}61 \text{ мм}.$$

В пределах партии обрабатываемых заготовок глубина расчетного цементационного слоя 0,61…0,905 мм.

4. Определим в соответствии с рис. 5.11, возможные предельные значения твердости на поверхности шейки вала.

Точка 1 характеризует максимальную твердость на поверхности при удалении с образующей шейки вала минимального припуска ($Z_{min} = 0{,}095$ мм), равную 62 ед. HRC .

Точка 4 характеризует минимальную расчетную величину твердости на образующей поверхности при удалении с образующей шейки вала максимального припуска ($Z_{max} = 0{,}19$ мм), равную 56HRC.

Таким образом неравномерность твердости в партии обрабатываемых валов лежит в пределах от 62 до 56 единиц по HRC.

Вариант 2.

1. Примем условие: в технологическом процессе отсутствует этап 6 восстановления базовой поверхности (фаски) перед окончательным шлифованием шейки вала. Тогда,

$$\rho_{\Sigma 2} = \rho_1 + \rho_3 + \rho_4.$$

2. Определим удаляемый припуск при чистовой обработке шейки вала:

$$Z = R \pm \rho\Sigma 2 - r,$$

$$Z_{min} = R_{min} - \rho_{1max} - \rho_{3max} - \rho_{4max} - r_{max};$$

$$Z_{min} = 25{,}125 - 0{,}01 - 0{,}05 - 0{,}02 - 25 = 0.045 \text{ мм};$$

$$Z_{max} = R_{max} + \rho_{1max} + \rho_{3max} + \rho_{4max} - r_{min};$$

$$Z_{max} = 25{,}15 + 0{,}01 + 0{,}05 + 0{,}02 - 24{,}99 = 0{,}24 \text{ мм}.$$

Таким образом, припуск удаляемый с одной стороны цилиндрической поверхности шейки, в партии обрабатываемых валов составит от 0,045 мм до 0,24 мм.

3. Определим возможную предельную глубину цементационного слоя на шейке вала:

$$Ц = Ц_o - Z;$$

$$Ц_{max} = Ц_{omax} - Z_{min};$$

$$Ц_{max} = 1{,}0 - 0{,}045 = 0{,}955 \text{ мм};$$

$$Ц_{min} = Ц_{omin} - Z_{max};$$

$$Ц_{min} = 0{,}8 - 0{,}24 = 0{,}56 \text{ мм}.$$

В пределах партии обрабатываемых валов глубина расчетного цементационного слоя составит 0,56...0,955 мм.

4. Определим в соответствии с рис. 5.11 возможные предельные значения твердости на поверхности шейки вала.

Точка 1' характеризует максимальную твердость на поверхности при удалении с образующей шейки минимального припуска (Z_{min} = 0,045 мм) 62,2 HRC. Точка 4' характеризует минимальную расчетную твердость на поверхности, при удалении с образующей максимального припуска (Z_{max} = 0,24 мм) 53 HRC.

Из приведенного анализа качественных показателей цементационного слоя шейки вала видно, что в варианте *1* технологического процесса (этап 6), восстановление базовых установочных поверхностей (фасок) качество изготовления выше.

Приведенные расчеты показывают предельные, но маловероятные ожидаемые расчетные значения.

Для учета вероятных, случайных значений составляющих параметров рассмотрим на приведенных выше примерах наиболее ожидаемые вероятные значения качественных показателей цементационного слоя у шейки вала.

Исходя из расчетных (арифметических) предельных значений параметров и в соответствии с прил. 1 и 2 определим вероятные ожидаемые значения удаляемого припуска $Z_в$ при чистовом шлифовании, глубину цементационного слоя $Ц_в$ и твердость на поверхности шейки вала.

1. Вероятное значение поля рассеивания припуска $\omega Z_в$:

$$Z_{max} = R_{max} + \rho_{1\,max} + \rho_{2\,max} - r_{min};$$
$$Z_{min} = R_{min} - \rho_{1max} - \rho_{2\,max} - r_{max};$$
$$\omega_Z = \omega_R + 2\rho_{1\,max} + 2\rho_{2\,max} + \omega_r,$$

так как

$$2\rho_{1\,max} = \omega_{бi},$$
$$\omega_Z = \omega_R + \omega_{б1} + \omega_{б2} + \omega_r;$$

тогда

$$\omega_{Zв} = K\,(\omega_R + \omega_{б1} + \omega_{б2} + \omega_г).$$

Для $m = 2$, $d = \omega_R/\omega_г = 0{,}025/\,0{,}01 = 2{,}5$, $\mu = 0{,}3$;
$n = 2$, $c = \omega_{б2}/\omega_{б1} = 0{,}04\,/0{,}02 = 2$, $\eta = 0{,}3$.

Для размерной цепи:

$$C^* = \omega_{б1}/\omega_г = 0{,}02\,/\,0{,}01 = 2.$$

Принимая процент риска $p = 0{,}027\%$, определим значения коэффициента теоретико-вероятностного суммирования K. Для приведенного случая $K = 0{,}76$ (см. прил. 2).

По нему находим наиболее вероятное значение поля рассеивания припуска $\omega_{Zв}$ для чистового этапа 7 обработки:

$$\omega_{Zв} = 0{,}76\,(0{,}025 + 0{,}02 + 0{,}04 + 0{,}01) = 0{,}0722 \text{ мм}.$$

2. Вероятное поле рассеивания глубины цементационного слоя на шейке вала.

$$Ц_{max} = Ц_{omax} - R_{min} + \rho_{1max} + \rho_{2\,max} + r_{max};$$
$$Ц_{min} = Ц_{omin} - R_{max} - \rho_{1max} - \rho_{2\,max} + r_{max};$$
$$\omega_Ц = \omega_{Цo} + \omega_R + 2\rho_{1\,max} + 2\rho_{2\,max} + \omega_г.$$

Так как

$$2\rho_{1\,max} = \omega_{бi},$$

имеем

$$\omega_Ц = \omega_{Цo} + \omega_R + \omega_{б1} + \omega_{б2} + \omega_r,$$

где

$$\omega_{Цo} = 0{,}2 \text{ мм}, \ \omega_R = 0{,}025 \text{ мм}, \ \omega_{б1} = 0{,}02 \text{ мм},$$
$$\omega_{б2} = 0{,}04 \text{ мм}; \ \omega_г = 0{,}01 \text{ мм}.$$

В данной цепи имеется пять составляющих звеньев: три m скалярных и два n векторных. Исходя из этого и прил. 2 для комбинированных размерных це-

пей необходимо определить коэффициент теоретико-вероятностного суммирования К.

Для $m = 3$, $d = \omega_{Цо}/\omega_r = 0{,}2/0{,}01 = 20$, $\mu = 0{,}3$;

$n = 2$, $c = \omega_{б2}/\omega_{б1} = 0{,}04/0{,}02 = 2$, $\eta = 0{,}3$.

Для размерной цепи:

$$C^* = \omega_{б1}/\omega_r = 0{,}02/0{,}1 = 2.$$

Приведенные отношения составляющих звеньев размерных цепей для скалярных $d = 20$ и векторных, $C = 2$, а также отношение минимальных значений скалярных и векторных составляющих $C^* = 2$ показывают, что эффективность вероятностного суммирования при таких значениях отсутствует. В связи с этим арифметическая предельная расчетная сумма является в данном случае наиболее объективной.

ГЛАВА 6
ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

6.1. КОНСТРУКЦИЯ, ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ И МАТЕРИАЛЫ

Характеристика корпусных деталей. Корпусные детали ГТД отличаются многообразием форм и способом изготовления. В большинстве случаев они являются базовыми элементами двигателя, на которые монтируются различные сборочные единицы и детали. К силовым корпусам крепятся входные и выходные устройства двигателя, коробки приводов для агрегатов, редуктор двигателя и другие элементы. На силовых корпусах размещаются узлы крепления двигателя к самолету.

К корпусным деталям ГТД предъявляются высокие требования по прочности и жесткости, они должны обеспечить: свободу от температурных деформаций отдельных элементов, входящих в корпусы; постоянство точности относительного положения деталей и узлов в статическом и динамическом состоянии; герметичность и прочность соединений; простоту и удобство изготовления и сборки. В то же время корпусные детали должны иметь малую массу.

Силовые корпусы ГТД состоят из отдельных корпусов: компрессора, подшипников, камер сгорания и турбины. С помощью фланцевых соединений эти корпусы болтами или шпильками соединяются в единую конструкцию.

Корпус компрессора может быть сделан цельным или разъемным: с разъемами в плоскости оси ротора или перпендикулярно ей. Корпус с продольным разрезом позволяет выполнять сборку компрессора с окончательно собранным и отбалансированным ротором.

Корпус турбины ГТД чаще выполняется в виде цилиндрического кольца или усеченного конуса, что определяется проточной частью турбины и числом ступеней. К передней части с помощью фланцевого крепления присоединяют корпус камеры сгорания, к задней части – сопловое устройство. Корпус турбины обычно составной. В многоступенчатой турбине составляющими частями являются наружные корпусы сопловых аппаратов. Разъемы корпуса турбины делают перпендикулярно оси. Их число определяется числом ступеней.

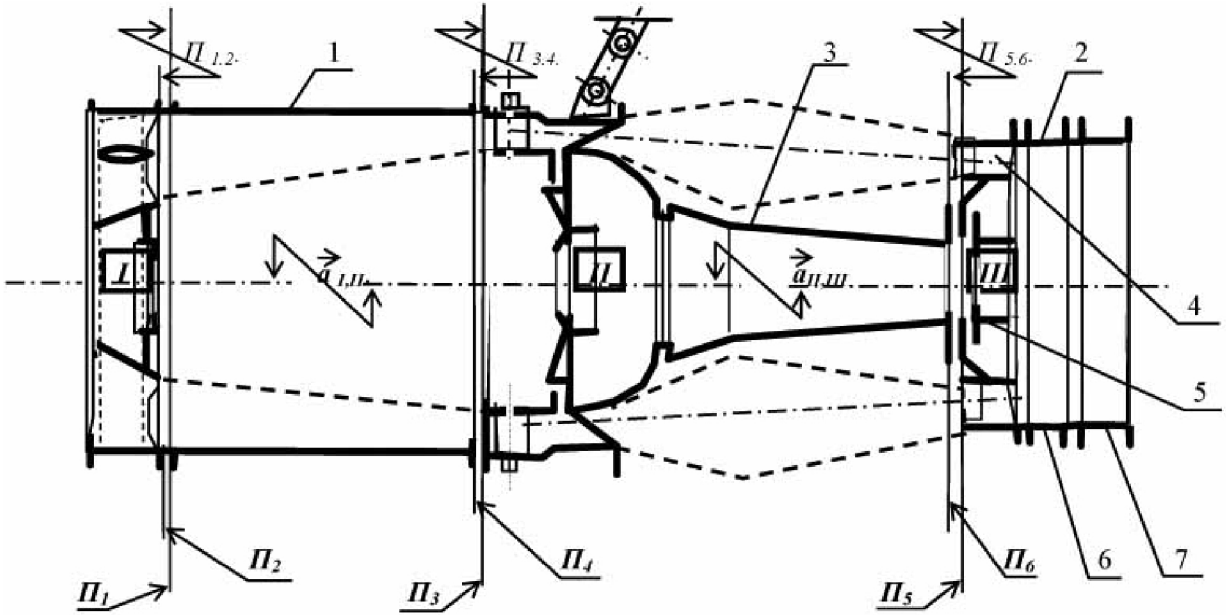


Рис. 6.1. Схема силового корпуса ГТД с осевым компрессором, с однорядной внутренней связью компрессора и турбины:

1 – корпус компрессора; *2* – корпус турбины; *3* – одинарная внутренняя связь компрессора с турбиной; *4* – литой сборник газосборника с радиальными связями; *5* – корпус заднего подшипника; *6* – корпус сопловых лопаток; *7* – корпус турбины

На рис. 6.1 представлена одна из схем силового составного корпуса ГТД. Корпус компрессора *1* соединен с входным направляющим аппаратом, который имеет в цилиндрической части элемент опоры для установки переднего подшипника *I*. Внутренняя одинарная связь *3* компрессора с турбиной имеет элемент опоры для размещения среднего подшипника *II*. Эта связь соединена через литой корпус газосборника *4* с корпусом турбины *2*. Размещенный в газосборнике корпус *5* заднего подшипника обеспечивает опору *III* ротора турбины, который находится за корпусом сопловых лопаток *6* в собственном корпусе турбины *7*. Этот корпус является основой всего двигателя, и от качества исполнения его отдельных корпусов и их сборки зависят показатели качества всего изделия.

Смещение и перекосы конструкторских и рабочих поверхностей, входящих деталей в данную сборочную единицу, определяют расположение основных опорных поверхностей под подшипники в двигателе относительно друг друга. Эти смещения $a_{I,II}$, $a_{II,III}$ являются векторными и определяются качеством выполнения отдельных корпусов данной сборочной единицы. Точность изготовления центрирующих посадочных поясков корпуса, точность расположения гнезд под подшипники относительно центрирующих поясков и точность сборки данных элементов ГТД обеспечивают необходимые заданные значения этих векторов.

Точность изготовления опорных торцов $П_1$, $П_2$, $П_3$, ... $П_6$ и точность расположения их относительно друг друга создают возможные смещения и перекосы $П_{1.2}$, $П_{3.4}$, $П_{5.6}$ поверхностей корпусных деталей, которые также влияют на показатели качества изделия.

Силовая связь корпусов подшипников и соплового аппарата конструктивно выполняется различными вариантами: с помощью радиальных шпилек или винтов, которые размещаются во внутренней полости сопловых лопаток; с помощью цельных литых корпусных газосборников; с помощью аппаратов разъемной конструкции [1].

В ГТД также находят применение различные корпусные детали, полученные методом сварки и пайки.

Корпусные детали ГТД можно условно разделить по конструктивно–технологическому признаку на следующие группы:

1) крупногабаритные полые тонкостенные корпусные детали цилиндрической и конической формы (корпусы осевых компрессоров и сопловых аппаратов, турбины, форсажной камеры, реактивного сопла и др.).

2) крупногабаритные силовые детали сложной формы (корпусы средней опоры, корпусы переднего и заднего подшипника и др.).

3) корпусные детали с фасонными поверхностями газовых и жидкостных трактов (корпусы входной части двигателя, вентилятора, камер сгорания, диффузора и др.);

4) корпусные детали коробчатого типа (корпусы приводов агрегатов, центробежных насосов, редукторов, маслонасосов и др.).

5) мелкие корпусные детали агрегатов регулирования и управления.

В зависимости от конструктивных особенностей, применяемого материала и видов заготовки, а также от метода сложности изготовления корпусные детали первой группы можно разделить на три подгруппы:

1) малонагруженные оболочки ГТД, изготовляемые из тонколистового материала (стали 20, 08кп, 1Х18Н9Т, 38ХА и др.) методами холодной штамповки, лазерной резки и различными видами сварки. Эти детали характеризуются малыми объемами механической обработки резанием. Последние этапы обработки таких деталей заключаются в использовании метода резания для поверхностей сопряжения;

2) корпусные тонкостенные детали, исходные заготовки которых получают методом отливки из алюминиевых и магниевых сплавов (АЛ4, АЛ5, АЛ8, МА5, МЛ5 и др.) кольцевого типа. Они характеризуются высокой точностью исполнения основных поверхностей и расположения их относительно друг друга. Особенностью этих деталей является также высокая точность расположения литейного контура заготовки относительно контура обработанного механически. Высокая трудоемкость и сложность механической обработки деталей данной подгруппы требует применения высокопроизводительного оборудования с ЧПУ;

3) корпусные детали из коррозионно-стойких, теплостойких легированных сталей, жаропрочных и титановых сплавов (1Х18Н9Т, 30ХГСА, 13Х11Н2В2МФ, 14Х17Н2, 09Х15НВЮ, ХН75ВМФЮ, ВТ5-1, ВТ-26, ВТ3-1, ВТ-14 и др.) изготавливаются из поковок, профилированных кольцевых заготовок и листовых материалов. Эти детали часто снабжены приваренными точечной и роликовой сваркой фланцами, обечайками, бабышками, ребрами жесткости и другими элементами.

Основные требования к корпусным деталям. К корпусным деталям ГТД предъявляются требования по точности, прочности, жесткости, износостойкости, минимальным деформациям при переменной температуре, герметичности, удобству сборки, разборки и технологичности изготовления.

К точности обработки основных поверхностей корпусных деталей предъявляются следующие требования:

1) точность формы конструкторских поверхностей (как правило, IT-5, IT-6);

2) точность взаимного расположения конструкторских поверхностей – степень IV;

3) точность рабочих поверхностей (как правило, IT-5);

4) точность взаимного расположения рабочих и конструкторских поверхностей – степени IV, V;

5) точность формы и расположения «свободных» поверхностей:

- точность формы «свободных» поверхностей, получаемых при механической обработке;

- точность формы «свободных» поверхностей, получаемых при литье и других видах формирования поверхностей при изготовлении исходной заготовки;

- точность расположения необрабатываемых поверхностей заготовки относительно обрабатываемых различными механическими и другими видами обработок (на рис. 6.2 эти поверхности показаны тонкими и жирными линиями);

6) шероховатость поверхностей корпусных деталей;

7) качество состояния поверхностного слоя детали и др.

Рассмотрим основные параметры точности для корпуса входного направляющего аппарата (КВНА) ГТД, представленного на рис. 6.2. Конструкторскими поверхностями корпуса являются поверхности K_1, K_2, K_3. Они определяют положение данной детали в сборочной единице:

плоская поверхность K_1 обеспечивает осевое положение корпуса в пространстве и создает плотное прилегание к сопрягаемой детали;

цилиндрическая поверхность K_2 обеспечивает центрирование КВНА относительно корпуса компрессора (см. рис. 6.1);

одно отверстие K_3 во фланце служит для ориентирования корпуса в угловом направлении.

Эти три поверхности выполняются с высокой точностью. В табл. 6.1 приведены примерные допустимые отклонения на основные параметры конструкторских поверхностей корпусной детали.

Рабочие поверхности детали предназначены для выполнения определенных функций. Так как корпусные детали выполняют много функций, то они имеют большое количество рабочих поверхностей. Для корпуса, приведенного на рис. 6.2, рассмотрены некоторые основные рабочие поверхности.

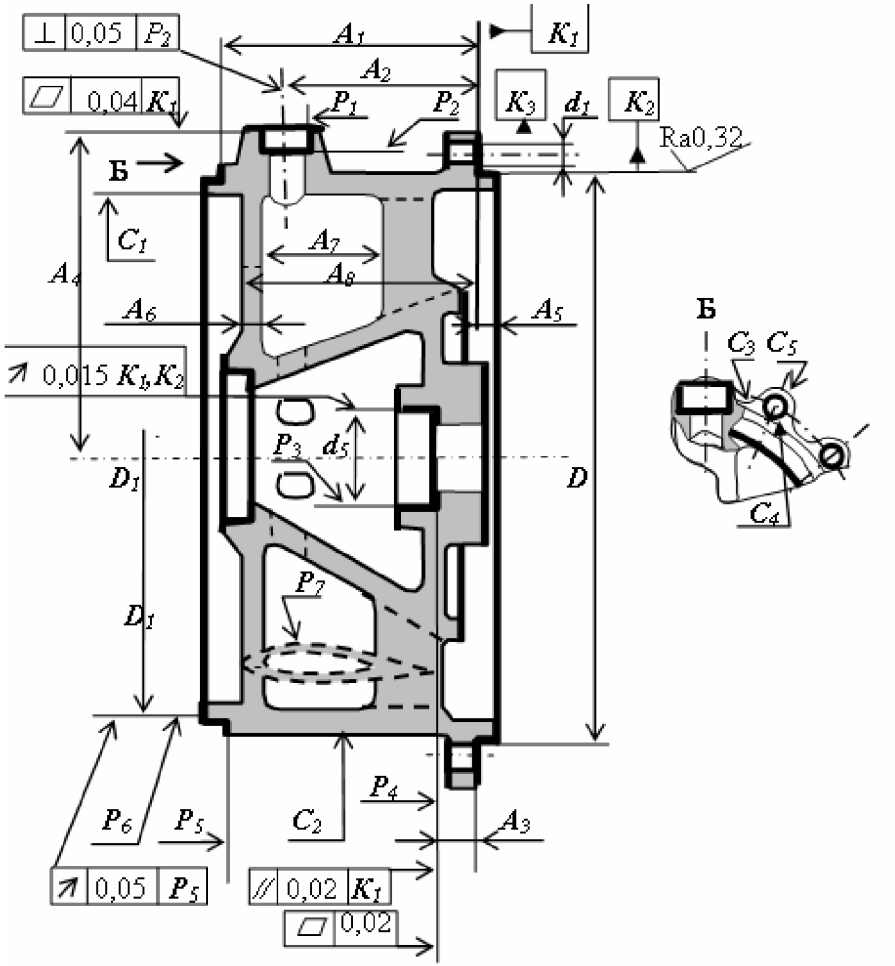


Рис. 6.2. Корпус входного направляющего аппарата ГТД

поверхности P_1 и P_2 определяют ориентирование и установку штуцера подачи воздуха в полость направляющих лопаток;

поверхности P_3 и P_4 предназначены для ориентирования блока подшипника передней опоры двигателя в данном корпусе;

поверхности P_5 и P_6 используются для установки внешнего кольца;

поверхность P_7 предназначена для направления потока воздуха в трактовой части ГТД и т.д.

К рабочим поверхностям деталей предъявляются высокие требования по точности. Как правило, они выполняются в пределах IT5–IT7. В табл. 6.2 и рис. 6.2 приведены примерные допустимые отклонения на основные параметры рабочих поверхностей и их возможное расположение относительно друг друга.

Таблица 6.1. – Примерные допустимые отклонения на основные параметры конструкторских поверхностей корпусной детали КВНА

Обозначение поверхности	Ориентирование в сборочной единице	Точность и шероховатость поверхности	Точность расположения поверхностей
K_1	Осевое	Плоскостность 0,03 мм проверить по краске; прилегание 80% без разрыва; шероховатость *Ra* 0,07 мкм	0,03 K_2
K_2	Радиальное	Точность диаметра IT6 (h6); точность формы поверхности в пределах половины допуска на диаметр; шероховатость *Ra*0,1	
K_3	Угловое	Точность диаметра IT6 (H6); точность формы поверхности в пределах половины допуска на диаметр	+ 0,05 K_2

Таблица 6.2. – Примерные допустимые отклонения на основные параметры рабочих поверхностей и их возможное расположение друг относительно друга

Обозначение поверхности	Ориентирование	Точность поверхности, особые условия, шероховатость	Точность расположения поверхностей
$P1$	Штуцера относительно данного корпуса	Точность диаметра IT6 (H6); шероховатость *Ra* 0,32 мкм	$\perp$ 0,05/100 P_2; + 0,15 K_1
P_2	Осевое, штуцера относительно данного корпуса	Плоскостность 0,04 мм; шероховатость *Ra* 0,32 мкм	
P_3	Переднего подшипника в сборочной единице	Точность диаметра IT5 (H5); точность формы поверхности в пределах 1/3 допуска на диаметр	↗ 0,015 K_1, K_2
P_4	Переднего подшипника в сборочной единице	Плоскостность 0,02 мм (проверить по краске, прилегание 80%); шероховатость *Ra* 0,32 мкм	↗ 0,02 P_3 // 0,02 K_1
P_5	Внешнего кольца в осевом направлении	Плоскостность 0,05 мм	// 0,05 K_1
P_6	Внешнего кольца в радиальном направлении	Точность диаметра IT7 (h7); шероховатость *Ra* 2,5 мкм	↗ 0,05 P_5
P_7	Потока воздуха на входе в двигатель	Точность профиля IT8; шероховатость – *Ra* 1,25 мкм	+ 0,3 K_1, K_2

Размеры A_1, A_2, A_3, A_4 и т.д. также определяют точность расположения рабочих и конструкторских поверхностей. Допуски на размеры, определяющие расположение, назначаются исходя из условий оптимальности эксплуатации и изготовления этих поверхностей. Требования к точности могут быть различными, например: положение оси штуцера подачи воздуха в полость направляющих лопаток корпуса, определяемого поверхностью P_1 в осевом направлении, задается в пределах ± 0,15 мм. В то же время точность расположения поверхности P_3 в радиальном направлении относительно поверхностей K_1, K_2 задается в пределах 0,015 мм, так как этот параметр существенно влияет на качественные показатели ГТД (оказывает непосредственное влияние на радиальный зазор между ротором и корпусом компрессора).

Точность выполнения свободных поверхностей C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 и т.д. в авиационном двигателестроении принимают для поверхностей, выполняемых механическими методами в пределах IT13, а для поверхностей, полученных методом литья IT14, IT15.

Весьма важными для корпусных деталей является взаимное расположение контуров, полученных литейным и механическим методами. Точность этих параметров существенно влияет на качественные показатели изделий при эксплуатации. Смещение этих контуров относительно друг друга приводит к уменьшению размеров стенок корпусов и ухудшению прочностных характеристик деталей, например: смещение литейного контура (поверхности C_5) фланца корпуса при обработке отверстий C_4 создает уменьшение стенки фланца, а смещение литейного контура корпуса (поверхностей C_1-C_3 и т.д.) в радиальном направлении при обработке поверхностей P_3-P_6 и т.д. приводит к разностенности в различных элементах корпусной детали. В связи с этим важным условием получения качественной корпусной детали является назначение размеров в чертежах и в операционных эскизах технологических процессов изготовления.

Правила по оптимизации размерных связей предусматривают выделение отдельных размерных комплексов:

1) для связи поверхностей, получаемых при литье;

2) для связи поверхностей, получаемых при механической обработке;

3) обеспечивающих связь контуров детали, получаемых при литье и механической обработке.

Необходимо отметить, что количество размеров, обеспечивающих связь между контурами поверхностей детали, должно быть минималь-

но-необходимое, но достаточное. (Для ориентирования контуров детали в пространстве в трех взаимно перпендикулярных плоскостях достаточно трех размеров).

На рис. 6.2 можно выделить размерные связи этих комплексов:

1) размеры A_6, A_7, и т.д. обеспечивают связь поверхностей в осевом направлении, получаемых при литье;

2) размеры A_1, A_2, A_3, A_4 и т.д. обеспечивают связь поверхностей при механической обработке;

3) размер A_8 обеспечивает связь поверхностей в осевом направлении, получаемых при литье и механической обработке.

Размерные связи внутри комплексов назначаются и выполняются исходя из условий технологичности конструкции заготовки, применяемой установочной оснастки, оборудования, инструмента и т. д. [10].

В то же время необходимо создавать технологические условия, позволяющие уменьшить количество составляющих звеньев размерных связей и уделять внимание вопросам качественной подготовки производства в процессе:

выбора метода литья исходной заготовки;

разработка чертежа и технологического процесса заготовки;

назначения и исполнения установочных базовых поверхностей для механической обработки в процессе получения исходной заготовки;

разработки технологического процесса механической обработки корпусных деталей;

выбора и использования оборудования, установочной оснастки и инструмента.

Таблица 6.3. – Уровни точности в зависимости от шероховатости

Уровень относительной геометрической точности $T_ф/T$	Ra/T, не более	Rz/T, не более
А (60 %)	0,05	0,2
В (40 %)	0,025	0,1
С (25 %)	0,012	0,05
Точнее С (менее 25%)	0,15	0,6

Примечание. Обозначения: $T_ф$ – допуск на форму поверхности; T – допуск на поверхность; A – нормальный уровень точности; B – повышенный уровень точности; C – высокий уровень точности.

Шероховатость поверхностей зависит от применяемого технологического процесса. Выполнение окончательных операций при механической обработке обеспечивают высокие качественные показатели. Параметры шероховатости поверхностей *Ra* и *Rz* следует назначать, руководствуясь таблицами, в которых установлена связь между точностью размера и шероховатостью поверхностей. В табл. 6.3 установлены зависимости параметров шероховатости от допуска на размер.

Качеству поверхностей при точном литье придается большое значение. Высокие требования чаще всего предъявляют к шероховатости внутренних полостей заготовок, особенно если их трудно или даже невозможно подвергнуть дальнейшей механической обработке. Так, детали, имеющие внутренние каналы сложной формы (корпусы, диски и лопатки турбины), должны иметь шероховатость внутренней поверхности *Rz*20, *Rz*40, а в некоторых случаях выше.

6.2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

6.2.1. Получение исходных заготовок методом

Литейное производство представляет собой процесс получения отливок путем заливки расплавленного металла (расплава) в литейные формы, в которых металл затвердевает. Методами точного литья можно получить сложные по очертаниям массивные и тонкостенные корпусы с большими бобышками у крупногабаритных деталей.

По точности размеров, шероховатости поверхностей, плотности материала и механическим свойствам заготовки, получаемые точным литьем, не уступают изготовленным из деформированного металла.

Отливку исходных литейных заготовок производят в специальных цехах. Формирование отливки осуществляется на этих основных участках производства. Формы, используемые для получения отливок, могут быть разовыми и постоянными. Разовые подразделяются на песчаные, песчано-цементные, гипсовые, керамические и др. Эти формы изготавливают из высокоогнеупорных материалов. Формы, изготавливаемые из чугуна, стали или из алюминиевых сплавов являются постоянными. Они обладают высокой стойкостью против действия расплавленного металла, поэтому в одной форме можно изготовить десятки тысяч отливок.

В настоящее время для оценки качества поверхностей отливки большое значение имеет их шероховатость.

На шероховатость поверхностей отливок влияет большое количество факторов и главным из них является состав смеси, из которой изготовлена форма, тонкость помола компонентов формовочного материала, его прочность, наличие пустой породы в гипсе и асбесте (если например, используется отливка в гипсовые формы), распушка волокон асбеста, отделка гипсовых, деревянных, металлических, керамических и других моделей, температура металла и формы, теплопроводность формовочного материала, его газопроницаемость, состав сплава, из которого отлита заготовка, литниковая система и прочее.

Особенно затруднительно получение крупных точных отливок с высокими показателями по шероховатости поверхности, поскольку чем больше поверхность детали, тем больше вероятность попадания в отливку кусочков формовочной массы, шлаковых включений и др.

Одним из главных видов брака, портящих поверхность отливки в точном литье, является образование в них засоров формовочным материалом.

Для устранения брака по качеству поверхности необходима, прежде всего, оптимальная конструкция отливки. Отливки лучше изготавливать тонкостенными, применять принудительные способы заполнения формы металлом, производить сушку форм при низких температурах, заливать металл в теплые формы и т. д.

Применение принудительных способов заполнения форм металлом (центробежное литье, вакуумное всасывание) способствуют улучшению поверхности отлитых деталей, благодаря тому, что металл под действием центробежной силы или давления воздуха точно передает очертания формы, плотно прилегая к ее рабочей плоскости, а кроме того, при этом можно понизить температуру металла и формы, что также улучшает качество поверхностей отливки.

На шероховатость поверхности разнообразных деталей оказывает влияние также состав сплава, из которого отливают детали. Так, детали, отлитые из алюминиевых сплавов марок АЛ19, АЛ8, имеют лучшую поверхность, чем детали из сплавов марок АЛ2, АЛ9, АЛ4. Одной из причин ухудшения поверхности является недостаточное количество легирующих элементов (например, магния в сплаве АЛ9).

Улучшение газопроницаемости гипсовых форм за счет обработки паром при давлении (012…0,13 МПа) 1,2 -1,3 ати в течение 6–8 ч. и накалывание верхней части формы проволокой также улучшает шероховатость поверхности отливки.

Высокие требования предъявляются к качеству материала корпуса и его поверхностному слою. Проведение операций по подготовке форм и металла к заливке расплава и соблюдение режимов, связанных с нагревом и охлаждением, существенно влияют на качество заготовок.

Характерными дефектами являются:

газовые раковины – закрытые и открытые полости в теле отливки, имеющие округлую или сферическую форму. Причинами возникновения газовых раковин является недостаточная газопроницаемость формы, а также чрезмерное переувлажнение формовочной смеси. Переуплотнение верхней полуформы, повышенная газотворная способность смесей, пониженная температура заливаемого металла, неправильная конструкция литниковой системы, повышенная газонасыщаемость металла и другие причины определяют качество исходных заготовок;

песчаные раковины – полости в теле отливки, заполненные формовочной смесью. Причинами образования песчаных раковин являются нарушения целостности форм и стержней в связи с некачественным их изготовлением, попадание формовочной смеси в полость формы при ее сборке и др.

усадочные раковины – полости в теле отливки, имеющие внутреннюю неровную поверхность. Они образуются обычно в утолщенных местах отливки.

На примере отливки корпусной детали (рис. 6.3) в песчаную форму рассмотрим основные этапы формирования исходной заготовки.

Модельную оснастку для отливок изготавливают по разработанным чертежам. Положение отливки в форме и поверхность разъема (МФ) должны обеспечивать сборку формы без затруднений. Наиболее ответственные части отливок следует размещать в нижней части формы. При верхнем расположении таких поверхностей необходимо исключить возможность образования в них усадочных раковин и шлаковых включений. Эти дефекты устраняются с помощью установки прибылей, повышения припуска на обработку и другими приемами. Положение отливки в форме и поверхность разъема должны обеспечить минимальное число отъемных частей модели и стержней. Для повышения точности отливки необходимо располагать ее в одной половине формы.

Отверстия небольших размеров удобнее получать в процессе отливки, а затем обрабатывать механическими методами затруднительно. Поэтому отверстия, диаметр которых больше 25 мм, выполняются в готовых отливках. Такие отверстия, показанные на рис. 6.3, формируются за счет стержней $СТ_3$ и $СТ_4$. Основная полость в корпусе создается за счет стержня $СТ_1$, а внутренняя полость заготовки за счет стержня $СТ_2$.

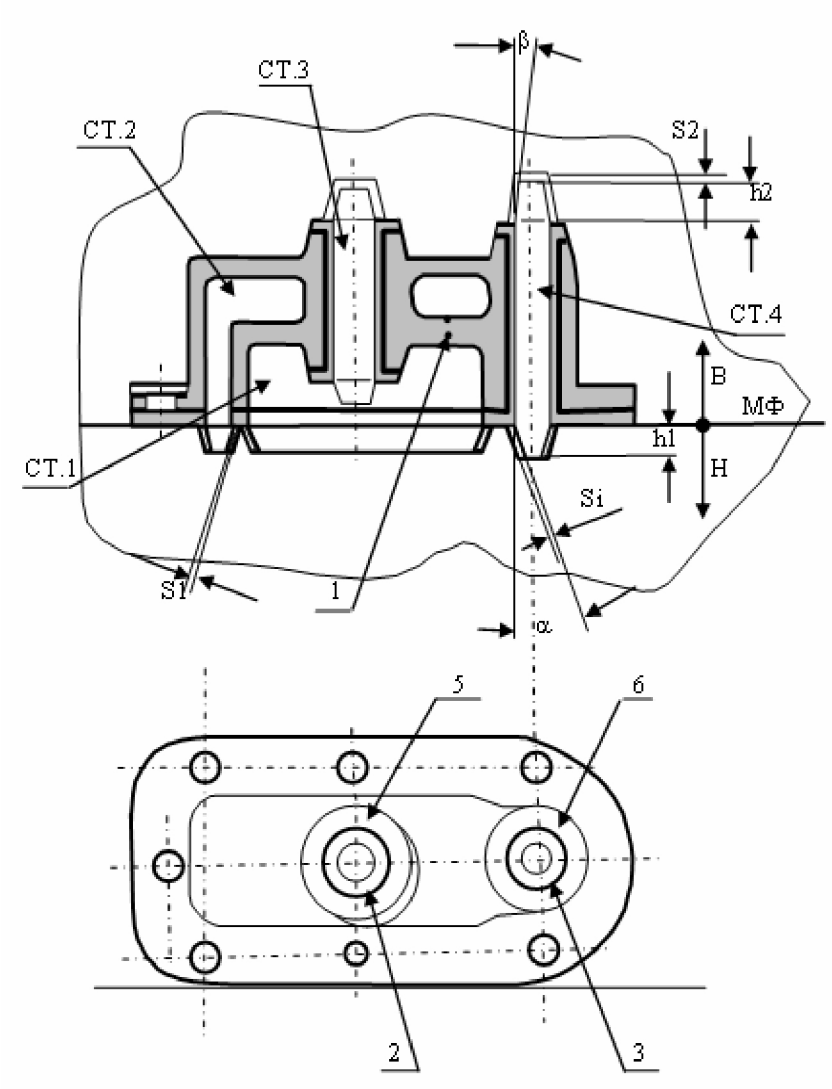


Рис. 6.3. Исходная заготовка корпусной детали

Стержневые знаки (установочные элементы для стержней), размещенные в горизонтальных и вертикальных плоскостях, обеспечивают устойчивое положение стержня в форме, точную фиксацию его положения, а также вывод газов из стержня при заливке металла в форму. Знаки должны иметь такие размеры, чтобы выдержать нагрузку от массы стержня, давление жидкого металла на верхнюю часть формы и стержень без деформации. Форма и ее размеры знаков и уклонов, а также величины зазоров между стержнем и знаком формы регламентируются нормалями (ГОСТ 3606 – 80).

Зазоры S_i устанавливаются в зависимости от размеров стержня и колеблются от 0,15 до нескольких мм. Уклоны α и β обеспечивают сборку литейной формы и повышают ее точность. Длину горизонтальных и вертикальных знаков h_1, h_2,...h_i принимают в зависимости от длины стержня. Иногда для стержня используют дополнительную опору, металлическую подставку – жеребейку *1*, которая после заливки металлом расплавляется.

Поверхность разъема модели и формы обозначают горизонтальной линией, над которой указывают обозначение разъема (МФ).

В процессе изготовления литейных форм, стержней и последующей их сборки обеспечивается точность формы заготовки и расположение элементов конструкции этой заготовки относительно друг друга. Из рис. 6.3 видно, что точность литейного контура заготовки (показанного тонкими линиями), может смещаться относительно контура, получаемого при механической обработке (контур показан жирными линиями), в большей степени, если составляющие элементы формы и стержней исполняются с невысокой точностью. Необходимо отметить, что, если расположение стержней CT_3 и CT_4 будет оказывать влияние на величину определяющую неравномерность припуска при расточке отверстий *2* и *3* при механической обработке, то смещение литейного контура исходной заготовки корпуса относительно растачиваемых отверстий *2* и *3* будет влиять на уменьшение стенок в бобышках *5* и *6*.

Для обеспечения извлечения модели из формы без повреждений все вертикальные стенки делают с формовочными уклонами. Чем больше вертикальная поверхность, тем меньше у нее формовочный уклон. Металлические модели имеют меньший формовочный уклон, чем деревянные. Уклоны на обрабатываемых вертикальных поверхностях назначаются сверх припуска на механическую обработку за счет увеличения размеров отливки (возникают напуски). По этому же принципу назначают припуски для необрабатываемых вертикальных стенок толщи-

ной 8…12 мм. Формовочные уклоны для моделей назначаются в зависимости от протяженности вертикальных стенок. В процессе отливки исходных заготовок используют различные формовочные материалы. Обычный формовочный материал, применяемый при литье в земляные формы (песок, скрепляемый глиной или органическими крепителями), быстро разрушается при нагреве до сравнительно невысоких температур (250…300°С); гипсовые формы можно нагревать до температур 750…800°С, не опасаясь разрушения из-за резкого снижения прочности.

Для изготовления разовых и полупостоянных литейных форм и стержней применяют кварцевые пески, глины, гипс, асбест, кристобалит, электрокорунд (в виде шлифпорошков и микропорошков), канифоль, парафин, техническую мочевину (карбамид), связующие материалы и добавки. Для предотвращения пригара формовочной смеси к поверхности отливки применяют противопригарочные материалы: графит, пылевидный кварц и т.д.

В табл. 6.4. приводятся основные формовочные смеси наиболее часто применяющиеся в точном литье из гипсовых форм.

Таблица 6.4. – Основные формовочные смеси, применяемые в точном литье

Компоненты	Содержание, %
Гипс, асбест	80, 20
Гипс, песок, асбест	40, 50, 10
Гипс, песок	30, 70
Гипс, кристобалит	30, 70

Формовочные и стержневые смеси характеризуются следующие технологические свойства, от которых зависит качество отливки:

прочность – способность смеси в уплотненном состоянии выдерживать нагрузки при заливке расплавленного металла и транспортировать формы;

огнеупорность – способность смеси не расплавляться под действием температуры жидкого материала;

газопроницаемость – способность смеси пропускать газы и пары;

газотворная способность – свойство формовочной смеси выделять газы при нагревании до высоких температур;

пластичность – способность смеси деформироваться под воздействием внешней нагрузки и сохранять полученную форму после снятия нагрузки;

податливость – способность формы или стержней изменяться в объеме, не препятствуя усадке отливок;

твердость – способность формы или стержней сопротивляться проникновению в них постороннего тела.

Высокая прочность гипсового формовочного материала дает возможность устанавливать массивные холодильники и прокаливать формы вместе с ними. Однако следует иметь в виду, что слишком большая прочность формы при затвердевании отливки препятствует усадке металла. Материал, используемый для формовки, должен быть податливым, и иметь только такую прочность, которая необходима, чтобы сохранить очертания залитого в форму металла. Чем меньше будет прочность формовочного материала, тем меньше он сопротивляется усадке затвердевающего сплава, что способствует деформации отливок, особенно если детали тонкостенные и должны иметь минимальные коробление и поводку.

В природе гипс встречается главным образом в виде двуводного сульфата кальция – двугидрата $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (гипсовый камень). При нагревании гипсового камня происходит его обезвоживание (дегидрация) с образованием полугидрата $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$ и капельно жидкой воды. Химическая реакция разложения двугидрата протекает теоретически при температуре 107° С.

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O = CaS_4 \cdot 0{,}5H_2O + 1{,}5H_2O.$$

В отечественной и зарубежной практике точного литья цветных металлов применяется высокопрочный гипс. Немалую роль при этом играют форма и размеры кристаллов. Кристаллы имеют плотную упаковку, гладкий рельеф поверхности с незначительным количеством пор и капилляров.

В высокопрочный гипс добавляют 35…45% (по массе) воды для придания ему необходимой литейной консистенции. Сроки схватывания вяжущих: для высокопрочного гипса – начало схватывания при добавлении воды через 3…4 минуты, конец – через 8…9 минут.

Асбест, добавляемый в гипсовые смеси, придает им ряд ценных качеств – уменьшает образование трещин благодаря армирующему действию несгораемых волокон, особенно если применяют длинноволокнистый асбест, уменьшает усадку гипса при нагреве, повышает прочность некоторых гипсовых смесей. Асбест представляет собой гидросиликат магния ($3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) [11]. Чтобы повысить армирующие действия асбестового волокна, его следует рас-

пушить и затем тщательно смешать в сухом виде с компонентами гипсовой смеси.

Прочность гипсового формовочного материала можно повысить введением органических и минеральных присадок. Органические присадки такие, как сульфато-спиртовая барда и мочевино-формальдегидные смолы могут увеличить прочность гипса в том случае, если формы не обрабатывают паром и сушат при температуре не выше 200° С. Органические присадки резко увеличивают прочность гипсовых смесей в сыром состоянии. Для увеличения прочности после прокаливания целесообразно вводить минеральные добавки: борную кислоту, пуцолановый цемент, портландцемент, кремнекислый натрий, коалин, тальк и др.

Для придания формовочному материалу новых ценных свойств, таких как повышенная газопрницаемость, резко уменьшенная усадка после прокаливания и сушка, было использовано свойство двуводного гипса к повторной перекристаллизации в паровой среде с повышенным давлением. При этом происходит отщепление воды в капельно-жидком виде, поскольку парциальное давление паров в окружающей среде значительно выше, чем в кристаллах двуводного сульфата кальция. Зерна гипса при этом разрыхляются, увеличиваются в размере и приобретают округлую форму. Прочность гипса, а следовательно, прочность гипсового материала после обработки паром падает. Обработка формовочного материала паром как в сыром, так и в прокаленном состоянии уменьшает прочность его примерно в два-три раза. Поэтому при получении максимальной прочности гипсовый формовочный материал подвергать такой обработке не рекомендуется.

6.2.2. Получение исходной заготовки корпуса входного направляющего аппарата (ВНА)

Заготовки ВНА получают методом отливки из магниевого сплава. Магниевые сплавы применяемые для основных корпусных деталей ГТД, имеют хорошие прочностные показатели и малую плотность (1,74 г/см^3). Характеристики используемого магниевого сплава МП96 приведены ниже [37]

Химический состав, %, основных элементов:

Nd……..1,9…2,6

In…….0,2…0,8

Zr……...0,4…1

Остальное Mg.

Механические свойства:

$\sigma_в$, МПа ……..250

δ_s, %.....11

НВ ……..55

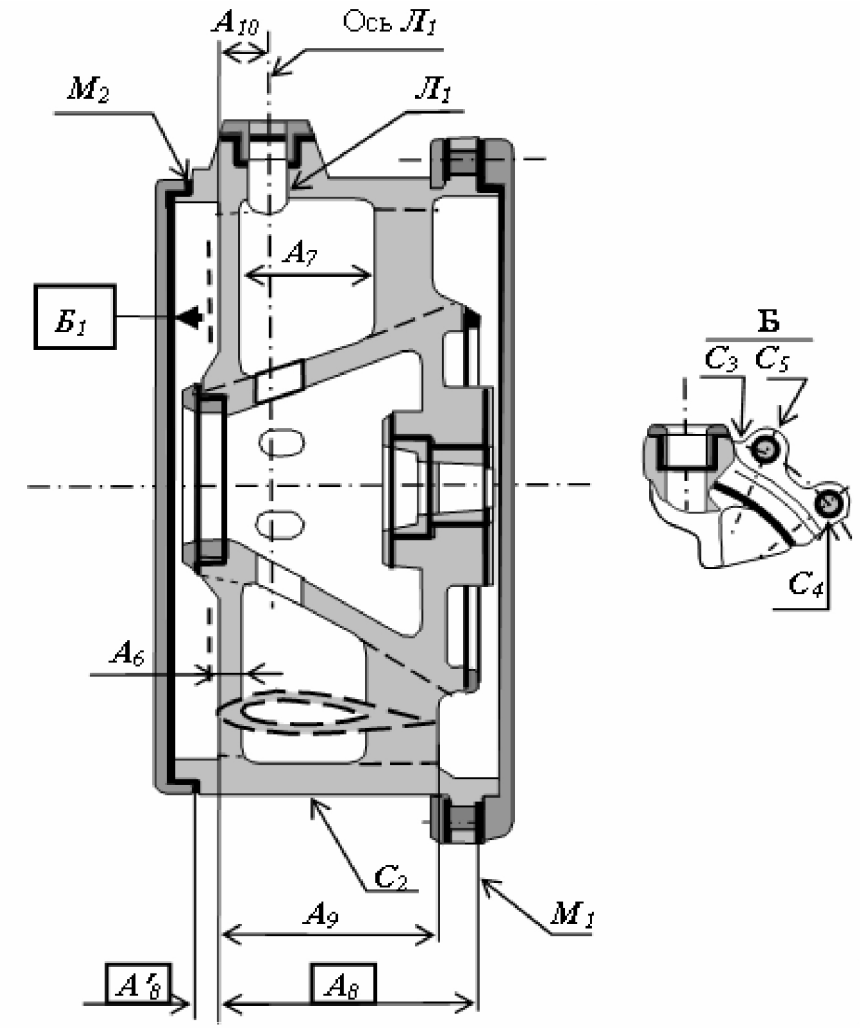


Рис. 6.4. Исходная заготовка корпуса входного направляющего аппарата ГТД

Технологический процесс получения исходных заготовок осуществляется на базе нескольких подготовительных операций. При создании формы для отливки заготовки используются модельные комплекты, обеспечивающие получение необходимой конфигурации. Эти комплекты обладают высокой прочностью и сохраняют точность размеров в течении определенного времени эксплуатации. В процессе монтажа моделей применяются координатные модельные плиты, модельные плиты с быстросменными модельными вкладышами, плиты с центрирующими поясками и другие устройства, обеспечивающие строгое ориентирование элементов литейной формы относительно друг друга. На рис. 6.4 представлен эскиз исходной заготовки ВНА, которая получена методом отливки в сборную литейную форму. Точность контура заготовки и ее отдельных элементов определяются комплектом технологической оснастки для создания литейной формы, процессом заливки расплавленного металла, охлаждением заготовки и т.д. Тонкими линиями показаны поверхности исходной заготовки, которые на этом этапе производства формируются окончательно. Качество этих поверхностей определяется литейным производством. Жирными – поверхности, подлежащие механической обработке. На этих поверхностях создается слой металла (припуск), который позволяет в процессе дальнейшей механической обработки создать необходимые качественные показатели корпусных деталей.

В табл. 6.5 представлены значения показателей качества поверхностей заготовок, полученных при различных способах литья [36].

В табл. 6.6 приведены примерные величины припусков, необходимые для качественной обработки поверхностей в зависимости от габаритных размеров и степени точности отливок в песчаные формы [37].

В табл. 6.7 представлены возможные отклонения геометрических параметров поверхностей исходных заготовок, полученных при различных способах литья [36]. В процессе создания чертежа отливки и разработки технологического процесса получения исходной заготовки весьма важным является выбор и подготовка исходных установочных базовых поверхностей для механической обработки корпуса.

При выборе базовых установочных поверхностей учитывается удобство для дальнейшей обработки и надежность закрепления заготовки. Установочные поверхности должны быть протяженными и обеспечивать минимальные погрешности установки. При назначении размеров исходной заготовки необходимо учитывать комплексность формирования этих размеров на различных этапах изготовления корпусных дета-

лей. Поверхности, окончательно формируемые на этапе отливки заготовок, должны иметь внутрикомплексную размерную связь и обеспечивать положение этого контура с контуром, полученным при механической обработке. Эта связь должна иметь минимально необходимое, но достаточное количество размеров.

При создании чертежа заготовки и технологического процесса производства учитываются возможные изменения в процессе отливки, например, изменения, связанные с литейной усадкой металла, %. Для алюминиевых сплавов усадка составляет 1…1,2%; для бронзы 1,2…1,6; для стали 2 – 3; для жаропрочных сплавов до 5% и т.д. Учитываются также необходимые литейные уклоны (табл. 6.8) и другие особенности производства.

Таблица 6.5. – Показатели качества поверхностей заготовок, полученных различными способами литья

Метод получения поверхности	*Ra*, мкм	Дефектный слой, мкм
Литье в песчаную форму при ручной формовке	100…500	200…600
Литье в песчаную форму при машинной формовке	80…300	150…400
Литье в металлические формы	100…200	100…300
Центробежное литье	40…100	100…200
Литье в оболочковые формы	20…80	150…250
Литье по выплавляемым моделям	10…40	80…150
Литье под давлением	10…40	80…150

Таблица 6.6. – Примерные припуски, необходимые для качественной обработки поверхностей

Наибольший габаритный размер отливки, мм	Номинальный размер, мм							
	До 50		Св. 50 до 120			Св. 120 до 260		
	1	2	1	2	3	1	2	3
До 120	2,5 2,0	3,5 2,5	2,5 2,0	4,0 3,0	4,5 3,5			
121…260	2,5 2,0	4,0 3,0	3,0 2,5	4,5 3,5	5,0 4,0	3,0 2,0	5,0 4,0	5,5 4,5
261…500	3,5 2,5	4,5 3,5	3,5 3,0	5,0 4,0	6,0 4,5	4,0 3,5	6,0 4,5	7,0 5,0
501…800	4,5 3,5	5,0 4,0	4,5 3,5	6,0 4,5	7,0 5,0	5,0 4,0	6,5 4,5	7,0 5,0
801…1250	5,0 3,5	6,0 4,0	5,0 4,0	7,0 5,0	7,0 5,5	6,0 4,5	7,0 5,0	8,0 6,0
1251…2000	5,5 4,0	7,0 4,5	6,0 4,5	7,5 4,5	8,0 5,0	6,5 6,0	8,0 5,5	8,0 6,0
2001…3150	6,0 4,0	7,0 5,0	6,5 4,5	7,5 5,0	9,0 7,0	6,5 4,5	8,0 5,5	9,0 7,0
3151…5000	6,0 4,5	7,5 5,5	6,5 5,0	7,5 5,5	9,0 7,0	7,0 5,0	8,0 6,0	10 8,0

Примечание. В числителе даны значения для верхнего положения поверхности при заливке, а в знаменателе – для нижнего и бокового.

Таблица 6.7. Возможные отклонения геометрических параметров поверхностей исходных заготовок, полученных при различных способах литья

Метод получения поверхности	Диаметр или толщина детали, мм				
	18…30	30…50	50…80	80…120	120…180
Пространственные отклонения поверхностей в зависимости от метода заготовительного производства					
Литье в песчаные формы деталей типа плит	4	4	3	3	2,5
Литье в металлические формы корпусных деталей	2	2	1	1	0,7
Отклонение от перпендикулярности торцов относительно боковых поверхностей или относительно основания					
Литье в песчаные формы	1…1,5	1,5…2	1,5…2,5	2…3	4…5
Литье в металлические формы	0,5…1	0,8…1,2	1…1,5	1,5…2	2…4

Показанный на рис. 6.4 комплекс линейных размерных связей поверхностей исходной заготовки в осевом направлении определяется особенностями литейного производства и связью с базовой установочной поверхностью $Б_1$ для механической обработки корпуса.

Размер A_7, определяющий внутренний канал направляющих лопастей ВНА и его точность зависят от процесса изготовления стержня, проведения заливки расплавленного металла и последующего охлаждения исходной заготовки. После разрушения и удаления стержня из внутреннего канала ВНА размер A_7 должен соответствовать чертежным значениям.

Размеры A_6 и A_9, определяющие соответственно толщину стенки у входной части направляющих лопастей ВНА и их длину, зависят от точности исполнения и расположения рабочих поверхностей литейной формы.

Таблица 6.8. – Уклоны на модели по ГОСТ 3213 – 92

Высота h, мм	Модель			
	металлическая, пластмассовая		деревянная	
		мм		мм
До 10	2°20′	0,40	2 ° 55′	0,50
Св. 10 « 16	1° 35′	0,45	1 ° 55′	0,55
« 16» 25	1 ° 10′	0,50	1 ° 30′	0,65
«25 « 40	50′	0,60	1 ° 05′	0,75
« 40» 63	35′	0,65	45′	0,85
« 63 « 100	25′	0,75	35′	1,00
« 100 « 160		0,95	25′	1,20
« 160 « 250		1,45	25′	1,85
« 250 « 400		2,30		2,30
« 400 «630	20′	3,65		3,65
« 630 « 1000		5,80	20′	5,80
« 1000 « 1600		9,30		9,30
« 1600 « 2500		14,50		14,50

Размер A_{10} определяющий положение оси отверстия $Л_1$ относительно принятой исходной базовой поверхности $Б_1$, зависит от точности положения литейного стержня, который после заливки расплавленного металла и его охлаждения будет разрушен и удален из полости заготовки. Размер A_{10} оказывает влияние на величину удаляемого припуска при расточке отверстия в бобышке корпуса.

Размер A_8 выполняется при механической обработке корпуса. От этого размера зависит точность связи литейного и механического контуров заготовки в осевом направлении.

Необходимо отметить, что представленный размер A_8 выражает один из возможных вариантов простановки размеров в технологическом процессе. При другом варианте простановки размеров, эта связь может быть выполнена размером A'_8. Использование различных вариантов простановки размеров зависит от удобства их выполнения, от влияния на последующую обработку корпуса и обеспечения необходимых качественных показателей деталей.

Таким образом, выбор базовых установочных поверхностей, простановка размеров и назначение точности на отдельные элементы корпус-

ной детали определяются технологическим процессом получения исходной заготовки и обработкой ее в механическом производстве.

В отдельных случаях производства корпусных деталей ГТД используются операции по разметке исходной заготовки с целью создания базовых установочных элементов в виде разметочных рисок и реперных точек. Данные разметочные элементы используются в механическом производстве корпусных деталей в качестве установочных баз. Эти элементы позволяют ориентировать и контролировать положение заготовки в технологической системе при дальнейшей обработке. Необходимость и возможность использования таких базовых установочных элементов будет рассмотрена ниже.

6.2.3. Маршрутная технология изготовления корпуса ВНА

В соответствии с заданными условиями в чертеже корпусной детали (см. рис. 6.1) и правилами построения технологических процессов (см. рис. 2.4) рассмотрим технологию изготовления корпуса ВНА.

Необходимо отметить, что количество ступеней обработки корпуса в механическом производстве непосредственно зависит от точности исходной заготовки (см. рис. 2.4). Если точность исходной заготовки невысокая, то припуск и его неравномерность при механической обработке имеют значительные величины.

В этом случае как на подготовительных (черновых), так и на основных этапах производства возникают дополнительные операции. При получении исходной заготовки методом точного литья создаются условия для сокращения цикла технологического процесса механической обработки корпусных деталей.

Способ получения исходной заготовки и последующий процесс механической обработки оцениваются экономическими показателями производства.

Технологический процесс механической обработки корпуса ВНА можно условно разделить на четыре основные части.

В первой технологического процесса (операции №5–65) производится подготовка исходных установочных баз заготовки и предварительная обработка поверхностей корпусной детали.

В этой части технологического процесса удаляются основные припуски и напуски, вызванные особенностями литейного производства. Осуществляется также обработка технологических базовых установоч-

ных поверхностей. В качестве подготавливаемых базовых поверхностей используются торцы и цилиндрические пояски корпусной детали.

При использовании исходных заготовок, выполненных литьем невысокой точности, проводится операция разметки литья.

В этой части технологического процесса осуществляются проверка герметичности и прочности материала корпуса и оксидирование поверхностей.

Во второй части технологического процесса (операции №70–90) осуществляется чистовая обработка основных поверхностей. Свободные поверхности на данном этапе технологического процесса обрабатываются окончательно. На рабочих поверхностях корпуса оставляется небольшой припуск для окончательной отделки.

В третьей части технологического процесса (операции №135–145) выполняется окончательная обработка конструкторских и рабочих поверхностей корпуса.

В четвертой части технологического процесса (операции № 150–165) предусматривается доводка и отделка корпуса. Выполняется также слесарная обработка и окончательный контроль.

План механической обработки исходной заготовки приведены ниже.

Первая часть.

№5. Заготовка (литья в песчаные формы), термическая обработка (отжиг).

№10. Входной контроль.

№15–45. Предварительная обработка корпуса и подготовка базовых установочных поверхностей.

№50. Оксидирование.

№55. Проверка на герметичность.

№60. Обработка отверстий во фланце.

№65. Слесарная обработка.

Вторая часть.

№70–90. Окончательная обработка свободных поверхностей методом фрезерования, точения и сверления.

№95–100. Чистовая обработка основных поверхностей корпуса методом фрезерования и точения.

№115–125. Чистовая обработка отдельных элементов рабочих и конструкторских поверхностей.

Третья часть.

№135–145. Окончательная обработка конструкторских и рабочих поверхностей. Слесарная обработка и нарезание резьб.

№ 150–165. Отделка основных элементов корпусной детали методами тонкого фрезерования, точения, нарезание мелких резьб, слесарной обработки и т.д.

Четвертая часть.

№170–180. Отделка корпуса методом шабровки, притирки и доводки основных конструкторских и рабочих поверхностей.

№185–190. Окончательная слесарная обработка, оксидирование по мере необходимости, прокачка каналов и промывка корпуса.

№195. Окончательный контроль.

В представленном технологическом процессе ВНА рассмотрены этапы обработки и выделены основные операции. Качественные показатели корпуса ВНА обеспечиваются последовательно на всех этапах обработки. В процессе обработки корпусных деталей в основном используется резание лезвийным инструментом.

Коэффициент обрабатываемости магниевых сплавов, используемых для деталей ГТД, равен 4. Этот материал хорошо обрабатывается механическими способами, которые обеспечивают необходимые показатели качества. При обработке магниевых сплавов резанием имеется некоторое ограничение в скорости резания, обусловленное особенностями лезвийной обработки таких сплавов.

Обработка магниевых сплавов требует тщательной проверки и поддержания в рабочем состоянии режущей кромки инструмента, так как обработка изношенным затупленным инструментом приводит к резкому повышению температуры в зоне резания, возгоранию пылевидных частиц, стружки и обрабатываемого материала.

Увлажненная магниевая стружка и пыль (при содержании воды от 4 до 4,8%) воспламеняется при более низких температурах, чем сухая при 360…370°С. Обработка магниевых сплавов проводится «в сухую», применение смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) не допускается. При обработке высокоточных отверстий методом развертывания и нарезании резьб используют в качестве смазочно-охлаждающей жидкости масло МС–20. На рабочем месте станочника не должно скапливаться значительное количество стружки.

При обработке на токарных станках используются резцы с пластинами из быстрорежущих сталей и твердых сплавов. Скорости резания при обработке таким инструментом составляют: для резцов из быстрорежущих сталей 1500 м/мин; для резцов с пластинами из твердого сплава 3000 м/ мин. Геометрические параметры прямого проходного резца при этом должны составлять: передний угол γ =15…25°, задние

углы $\alpha = 10°$, $\alpha_1 = 10°$, главный угол в плане $\varphi = 45°$, вспомогательный угол в плане $\varphi' = 15°$, радиус при вершине $r = 0{,}5$ мм.

6.2.4. Механическая обработка корпуса ВНА

Первая часть технологического процесса механической обработки исходной заготовки корпусной детали начинается со снятия основного слоя припусков и напусков отливки. Данные операции выполняются на токарных станках моделей SN20B, TOS, 1М63Б, которые обладают высокой производительностью. При обработке используется режущий инструмент, оснащенный пластинами из твердого сплава ВК–6 и ВК–8. Операции проводятся со снятием значительных слоев металла при следующих режимах обработки: скорости резания 200…400 м/мин; подачи 0,1…0,12 мм/об. Съем припуска осуществляется в несколько проходов (два-четыре прохода). На предварительной обработке корпуса ВНА обеспечиваются геометрические параметры с отклонениями, не превышающими 0,4…0,5 мм. Шероховатость обрабатываемых поверхностей обеспечивается в пределах *Ra* =2,5 мкм.

На этом этапе осуществляется подготовка базовых установочных поверхностей для дальнейшей обработки корпуса. В качестве базовых установочных поверхностей служат протяженные торцевые поверхности (торцы фланцев), центрирующие цилиндрические пояски и отверстие во фланце корпуса. Эти поверхности изготавливаются повышенной точности с целью уменьшения погрешностей ориентирования заготовки на последующих операциях технологического процесса.

Операция №50 предусматривает проведение оксидирования поверхностей исходной заготовки в водном растворе при температуре 20°С, с выдержкой в течение 10…12 минут. Состав водного раствора:

двухромокислый калий 30…50 гр/л; квасцы алюминиевокалиевые 8…12 гр/л; 60-процентная уксусная кислота 5…8 мг/л, плотность раствора РН не выше 3,5. После оксидирования поверхности корпуса защищены пленкой золотистого цвета. Допускается получение пленки черного цвета.

На операции №55 выполняется проверка герметичности корпуса: проводится заполнение внутренней полости корпуса антикоррозийной жидкостью; создается избыточное давление в пределах 0,2…0,25 МПа (2…2,5 ати); после выдержки, в течении 5 мин., по манометру проверяется падение давления. Если падения давления не наблюдается, то процесс обработки корпусных заготовок продолжается.

Операции №65–70 – обработка отверстий во фланцах корпуса выполняются на агрегатном станке с автоматизированным приводом и поворотным столом. Сверлятся 35 отверстий диаметром 9 мм на выходном фланце и 18 отверстий диаметром 6,8 мм – на входном. При обработке используются спиральные сверла из инструментальной стали Р9. Режимы резания при этом составляют: скорость резания 40…50 м/мин (n = 1200…1500 мин$^{-1}$), подача S_o = 0,08…0,1 мм/об. Подготовленное базовое установочное отверстие используется на последующих операциях для ориентирования заготовки в угловом направлении.

Вторая часть технологического процесса выполняется на высокопроизводительном оборудовании с ЧПУ: на горизонтально-фрезерных и вертикально-фрезерных станках мод. 6М13ГН-1Н, 6М12П, фрезерно-сверлильном «Горизон-3», радиально-сверлильном 2А-53 и др. В этой части технологического процесса применяются цилиндрические и концевые фрезы из быстрорежущих инструментальных сталей Р9, диаметром от 40 до 80 мм. Режимы резания при обработке внутренних контуров корпуса составляют: скорость резания 200…250 м/мин, подача от 1 до 4 м/мин. При обработке глубоких отверстий диаметром 12 мм используются радиально-сверлильные станки. Скорость резания при выполнении этих операций соответствует 40…50 м/мин (n = 1200…1400 мин$^{-1}$), а подача составляет S_o = 0,05…0,1 мм/об.

В этой части технологического процесса производится обработка боковых фланцев корпуса ВНА (рис. 6.5, вид *В*). Эти операции производятся на фрезерно-сверлильных станках с ЧПУ типа «Горизон-3». С помощью управляющих программ производится обработка в один-два прохода торцовых поверхностей, отверстий, фасок и других конструктивных элементов корпуса ВНА. Эти операции осуществляются в полуавтоматическом режиме. Настройка инструмента выполняется вне станка на оптических приборах относительно эталонных образцов.

Третья часть технологического процесса предусматривает окончательную чистовую обработку конструкторских и рабочих поверхностей корпуса ВНА. На этом этапе используется оборудование высокой точности: токарные, вертикально-расточные, фрезерные и другие станки с ЧПУ осуществляют обработку мелких канавок, лысок, платиков и других элементов. В этой части технологического процесса производится нарезание резьб на шарнирном резьбонарезном станке. Здесь окончательно формируются различные посадочные элементы корпуса ВНА.

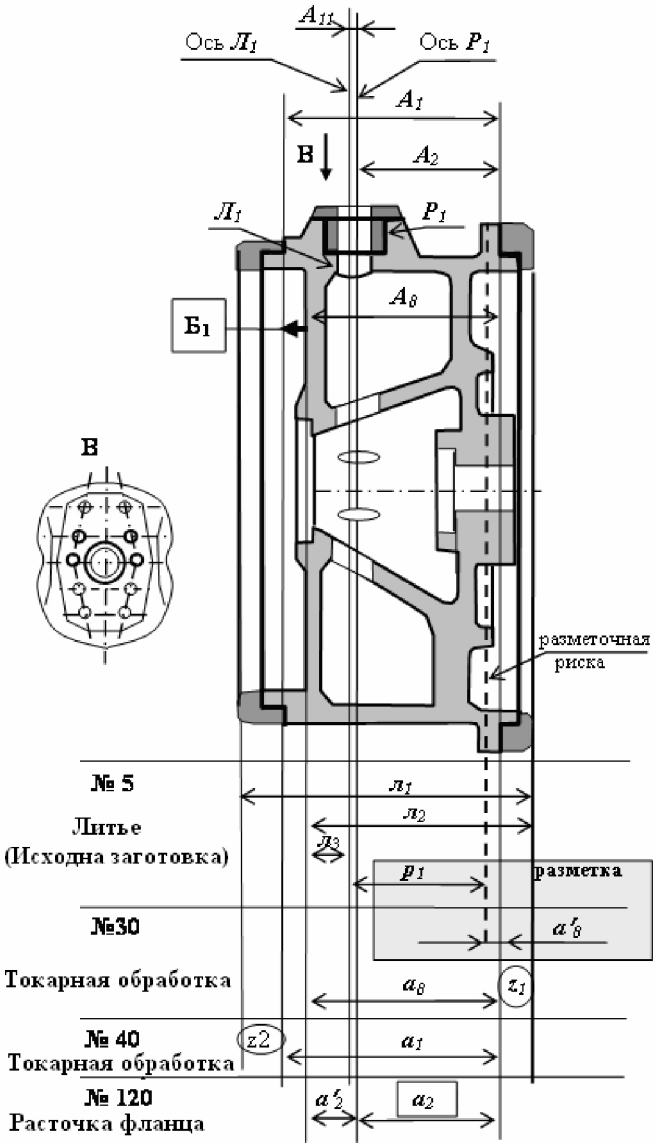


Рис. 6.5. Комплексная схема размерных связей технологического процесса ВНА

Четвертая часть технологического процесса заключается в доводке наиболее ответственных поверхностей корпуса. Осуществляется шабрение и притирка отдельных торцевых поверхностей. Выполняется прокачка каналов корпусной детали, окончательная слесарная доводка, промывка и контролируются качественные показатели корпуса. При контроле используется координатно-измерительная машина с ЧПУ, которая позволяет с высокой точностью проверить основные геометрические параметры корпуса ВНА.

Важным условием при изготовлении корпусных деталей является обеспечение расположения контуров поверхностей детали, полученных при литье и механической обработке. Это условие задается в чертеже детали, как возможное допустимое смещение контуров поверхностей относительно номинального положения (относительно конструкторских баз) в определенных пределах. Значительное смещение контуров поверхностей уменьшает прочностные характеристики детали, ухудшает сборку изделий и создает сложности при выполнении ряда операций технологического процесса.

Точность расположения контуров поверхностей корпуса зависит от ряда операций технологического процесса. В первую очередь это условие определяется подготовкой базовых установочных поверхностей в первой части технологического процесса механической обработки. В то же время эти операции связаны с подготовкой исходных установочных базовых элементов при литье заготовки.

Рассмотрим комплексную схему размерных связей технологического процесса корпусной детали ВНА. Эта схема позволяет выявить взаимосвязанные размерные цепи, составляющие параметры которых получены в разных операциях технологического процесса.

В качестве анализируемого параметра размерных цепей рассмотрим один, наиболее характерный размер А11 от выполнения этого размера зависит расположение литейного конура фланца (вид B), положение отверстия во фланце корпуса (поверхность $Л_1$), положение крепежных отверстий во фланце и т.д.

Из технологического процесса, рассмотренного выше, выбраны операции, которые формируют выполнение заданного размера A_{11}.

Произведем размерный анализ на основании исходных данных представленного технологического процесса.

Известны размеры, заданные в чертеже корпуса ВНА:

$A_{11} = 0 \pm 1$ мм, $A_1 = 230 - 0{,}2$ мм, $A_2 = 130 \pm 0{,}2$ мм.

Известны операционные размеры:

№5) $л1 = 242\ ^{+3}_{-2}$; $л_2 = \pm 1{,}5$; $л_3 = 60 \pm 1{,}25$ мм (см. табл. 6.7, 6.8)

(в данном случае литье выполняется в песчаные формы);

№30) $a_8 = 190 \pm 0{,}3$ мм;

№40) $a_1 = 230 - 0{,}2$ мм;

№120) $a_2 = 130 \pm 0{,}2$ мм.

В соответствии с комплексной схемой размерных цепей произведем анализ заданного размера A_{11}.

Общее уравнение размерной цепи, определяющее формирование этого размера имеет вид:

$$\pm A_{11} + a_2 - a_8 + л_3 = 0.$$

В этом уравнении размер A_{11} является замыкающим звеном размерной цепи. Знаки «±» показывают, что данное звено является проекцией модуля вектора на направление замыкающего звена линейной размерной цепи. Уравнение замыкающего звена размерной цепи имеет вид:

$$\pm A_{11} = л_3 + a_2 - a_8,$$

Тогда возможные предельные значения замыкающего звена размерной цепи будут иметь вид:

$$A_{11\,\max} = л_{3\,\max} + a_{2\,\max} - a_{8\,\min};$$
$$-A_{11\,\max} = л_{3\,\min} + a_{2\,\min} - a_{8\,\max}.$$

Соответственно предельные значения замыкающего звена А11 имеют следующие значения:

$$A_{11\,\max} = 61{,}25 + 130{,}2 - 189{,}7 = 1{,}75 \text{ мм};$$
$$-A_{11\,\max} = 58{,}75 + 129{,}8 - 190{,}3 = -1{,}75 \text{ мм}.$$

Эти данные показывают, что нарушаются допустимые значения по расположению контуров поверхностей относительно заданных (± 1 мм) в чертеже корпуса ВНА.

Устранить такое нарушение можно, используя следующие технологические приемы:

1) повысить точность составляющих звеньев размерных цепей;

2) изменить простановку размеров в операциях технологического процесса;

3) изменить порядок выполнения операций;

4) ввести в технологический процесс дополнительные операции;

5) использовать операцию разметки литья для ориентирования исходной заготовки при подготовке технологических установочных баз в первой части процесса.

Первое условие требует применения более точных способов получения исходных заготовок, повышения точности обработки на предварительных операциях и использование других технологических мероприятий в технологическом процессе.

Второе условие также позволяет уменьшить возможные рассеивания замыкающего звена.

В рассматриваемом случае это условие может быть выполнено при следующих изменениях.

На операции № 120 (расточка фланца) изменяются базирование заготовки в технологической системе и простановка операционного размера. В качестве установочной базы на этой операции используется поверхность $Б_1$ и операционный размер $a'_2 = 60 \pm 0{,}2$ мм.

В этом случае общее уравнение анализируемого размера A_{11} имеет вид:

$$\pm A_{11} = л_3 - a'_2,$$

Тогда,

$$A_{11\,max} = л_{3\,max} - a_{2\,min}.$$
$$-A_{11\,max} = л_{3\,min} - a'_{2\,max}.$$

Соответственно предельные размеры замыкающего звена имеют значения:

$$A_{11\,max} = 1{,}45 \text{ мм}; -A_{11\,max} = -1{,}45 \text{ мм}.$$

Из приведенного примера видно, что поле возможного рассеивания размера A_{11} после принятых изменений технологического процесса уменьшилось, но не обеспечило значения (±1 мм), заданного в чертеже корпуса ВНА.

Рассмотрим операцию разметки литья.

На операции №30 (обработка торца) выполняется размер a'_8, который контролируется относительно разметочной риски, полученной при подготовке исходной заготовки в процессе разметки (размер p_1).

В этом случае уравнение замыкающего звена (размера A_{11}) имеет вид:

$$\pm A_{11} = p_1 + a'_8 - a_2.$$

Принимая операционные размеры $p_1 = 128 \pm 0{,}2$ мм, $a'_8 = 2 \pm 0{,}3$ мм и $a_2 = 130 \pm 0{,}2$ мм имеем:

$$A_{11\,max} = p_{1\,max} + a'_{8\,max} - a_{2\,min} = 0{,}7 \text{ мм},$$
$$-A_{11\,max} = p_{1\,min} + a'_{8\,min} - a_{2\,max} = -0{,}7 \text{ мм}.$$

Результаты расчета показывают, что заданное значение допустимого смещения контуров поверхностей исходных заготовок при таком технологическом процессе будет по данному параметру обеспечено.

Рассмотрим операцию **разметки литья**, которая применяется при подготовке исходной заготовки. В процессе получения исходной заготовки методом литья используется ряд операций по созданию литейной формы, стержней, литниковой системы, выпоров, холодильников и других элементов, необходимых для проведения качественной отливки. Эти элементы соединяются в общую систему с помощью установочных плит, опок и других устройств. После сборки этой системы осуществляется контроль качества выходных параметров.

В процессе заливки расплавленного металла, его охлаждения имеют место изменения геометрических параметров исходной заготовки относительно размеров литейной формы. Эти изменения связаны с усадкой материала, неравномерностью охлаждения различных элементов отливок, возможным короблением в процессе остывания заготовки и дру-

гими явлениями. Систематические постоянные данных изменений учитываются при проектировании литейных форм и их элементов (см. 6.2.2.). Поля рассеивания систематических и случайных составляющих для партии отливок аналитически определить чрезвычайно сложно. В связи с этим в процессе освоения литейного производства различных типоразмеров корпусных деталей проводят освоение и доводку этих сложных технологических процессов.

После получения первой отливки выполняют операцию по разметке литья. Точность проведения определяется применяемыми средствами производства и лежит в пределах 0,3…0,5 мм.

Целью проведения данной операции является:

1) обеспечение контроля **качественных показателей исходной заготовки;** создание мероприятий по корректировке литейной оснастки, в случае необходимости, и определить направления совершенствования процесса литья исходных заготовок;

2) подготовка **базовых установочных элементов для механического производства** корпусных деталей. Эти элементы выполняются в виде разметочных рисок и реперных точек. Точное положение этих элементов позволяет ориентировать исходную заготовку в трех координатных направлениях в технологической системе при механической обработке.

На рис. 6.6 представлена схема проведения операции по **разметке литья**. Заготовка *1* устанавливается на три регулируемых домкрата *2* и выверяется относительно опорной плоскости разметочной плиты *3*. При выверке, домкратами *2*, создается параллельное положение оси $Л_1$ отверстия во фланце относительно плоскости разметочной плиты. Это достигается измерением фактического положения образующих поверхностей отверстия, полученного за счет стержня при отливке, и расчетом расстояния оси этого отверстия до плоскости плиты. По результатам расчетов в необходимых местах проводятся параллельные разметочные риски с помощью рейсмуса или других контрольно-измерительных устройств. Размеры (p_1, p_2,.. и т.д.) выполняются на основании согласования с технологической службой механического производства. Поворачивая исходную заготовку относительно плоскости разметочной плиты разметочные риски наносят в поперечном направлении. При этом создают перпендикулярность разметочных рисок относительно друг друга. По круговым разметочным рискам с помощью керна ставят ре-

перные точки, как правило, на фланцах корпуса (см. рис. 6.4, вид *Б*). Данные точки используют для ориентирования кондуктора при обработке отверстий во фланце.

Необходимо отметить, что рассмотрена лишь небольшая часть сложной операции получения качественной заготовки из отливки невысокой точности. Использование разметочных рисок и реперных точек для ориентирования заготовок в технологической системе при механической обработке создает ряд трудностей, которые выражаются в следующем:

1) невозможности использования метода достижения точности при обработке на настроенных станках в автоматическом или полуавтоматическом цикле;

2) увеличении трудоемкости при установке заготовок и ориентировании их в технологической системе за счет выверки;

3) увеличении трудоемкости подготовительных операций при изготовлении исходных заготовок.

Применение операций по разметке литья исходных заготовок невысокой точности должно обосновываться экономической целесообразностью и возможностями существующего производства.

Наиболее характерными операциями при обработке корпусных деталей, исходные заготовки которых получены методом литья, являются формирование комплекса рабочих отверстий во фланцах. Эти отверстия выполняются с высокой точностью.

На операции №140 (рис. 6.7) – обработка основных элементов фланца на станке с ЧПУ «обрабатывающий центр».

Заготовка устанавливается в технологической системе на специальное приспособление и центрируется по цилиндрическому пояску *Д*. Осевое ориентирование заготовки выполняется по торцу K_1 фланца. Угловое положение заготовки определяется ромбическим пальцем, который фиксирует ее положение по отверстию d во фланце. Крепление корпуса на приспособлении выполняется по противоположному торцу.

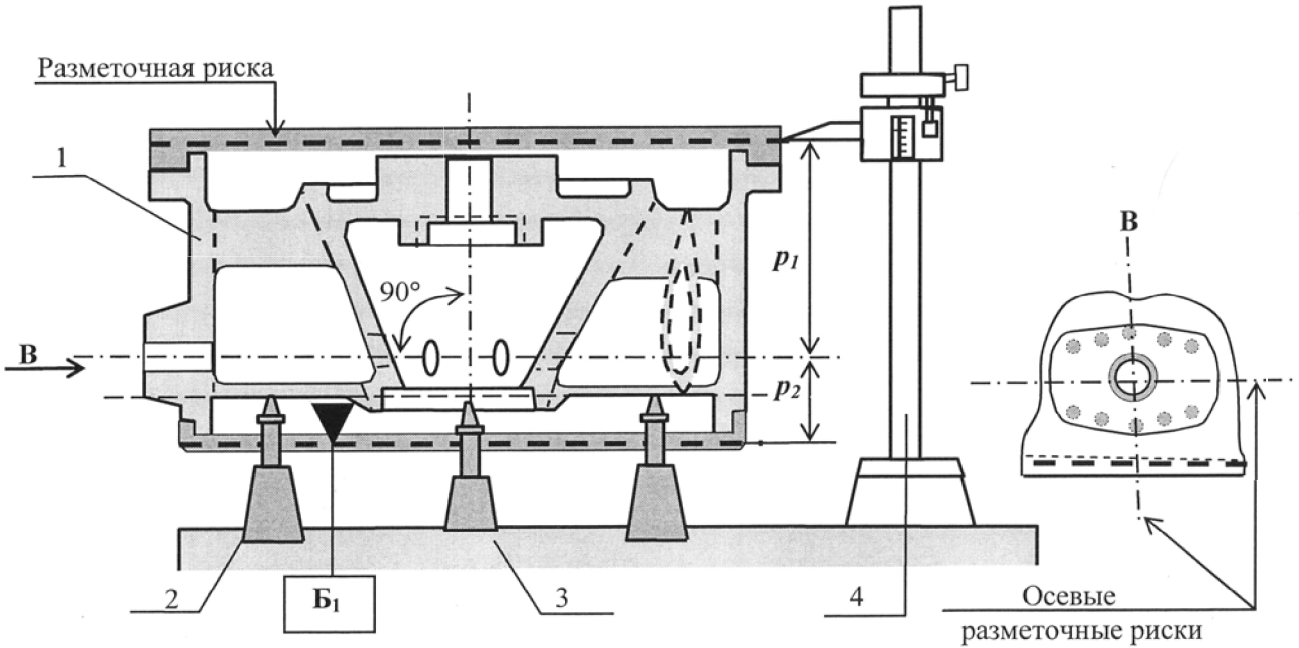


Рис. 6.6 Схема разметки исходной заготовки корпуса ВНА.

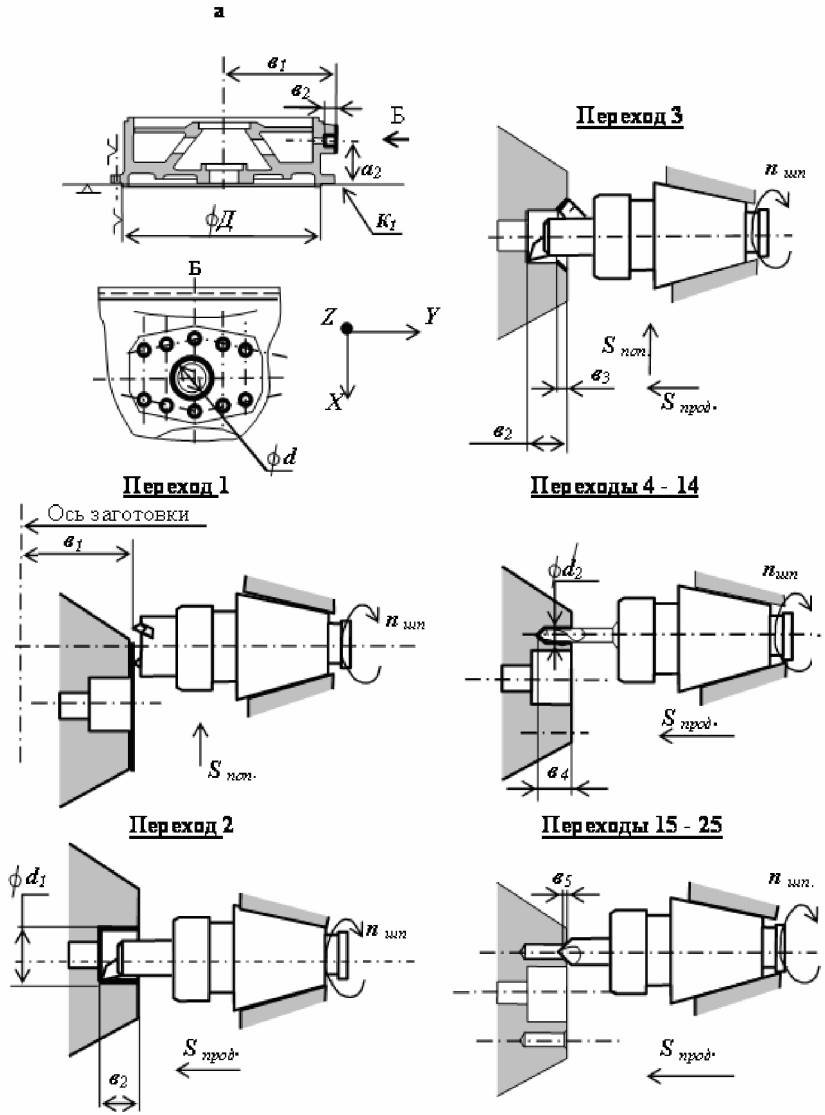


Рис. 6.7. Схема последовательности выполнения операции №140

Операция проводится на настроенном станке в полуавтоматическом и автоматическом режиме. Инструментальными блоками, которые размещаются в магазине станка. По мере необходимости эти блоки с помощью манипулятора станка устанавливаются на рабочий шпиндель или снимаются с него. Предварительно все инструментальные блоки настраиваются на расчетные размеры с помощью специального оптического контрольно-измерительного устройства. Настройку данной операции производит высококвалифицированный рабочий-наладчик.

После установки заготовки оператор включает автоматическую систему и станок выполняет обработку поверхностей заготовки (корпуса) по специальной управляющей программе.

Переход 1 по механической обработке корпуса производится торцовой фрезой, которая из нулевой точки станка перемещается на холостом ходу по оси Z, в рабочее положение. За счет вращения $n_{шп}$ и поперечного перемещения $S_{поп}$ в плоскости XY производится подрезка торца и обеспечивается заданный операционный размер $в_1$, который определяет положение фрезеруемого торца относительно оси заготовки.

Переход 2 выполняется расточной головкой, которая устанавливается в шпиндель станка после снятия торцевой фрезы. Установка выполняется манипулятором станка. При расточке отверстия выполняются продольное перемещение головки $S_{пр}$ относительно оси Z и вращательное движение $n_{шп}$. В процессе обработки формируются основные геометрические параметры: диаметр отверстия d_1 и положение оси этого отверстия (размер a_2) относительно базового торца K_1 заготовки. В этом переходе обеспечивается также глубина расточки (размер $в_2$) отверстия.

Переход 3 заключается в подрезке внутреннего торца у растачиваемого отверстия d_1 и снятия фаски (размер $в_3$).При выполнении этого перехода производятся продольное $S_{прод}$ и поперечное $S_{поп}$ перемещения.

На переходах 4–14 выполняется последовательная обработка отверстий под резьбу специальным сверлом, который установлен в инструментальный блок и настроен на необходимый операционный размер $в_4$. Сверло закреплено в инструментальном блоке с помощью цанги. При сверлении отверстия d_2 обеспечиваются также координатные размеры в плоскости XY. Эти размеры отражены в программе управления перемещением шпинделя станка в координатной системе. После обработки отверстия и отвода инструмента от заготовки производится перемещение его в плоскости XY на необходимый вектор смещения для обработки следующего отверстия и т.д.

Переходы 15–25 предусматривают снятие фаски (размер $в_5$) в отверстии зенкером, угол профиля которого соответствует заданному операционному размеру.

Оператор, выполняющий данную операцию технологического процесса, контролирует заданные значения геометрических параметров и по мере необходимости осуществляет замену инструментальных блоков в магазине станка.

ГЛАВА7
ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ГТД.

7.1. КОНСТРУКЦИЯ, ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ И МАТЕРИАЛЫ

В редукторах и коробках отбора мощности авиационных двигателей используются зубчатые колеса разнообразных конструкций (рис. 7.1). Их конструируют с учетом обеспечения минимальных масс, минимальных габаритов, высокой надежности. При этом зубчатые колеса авиационных двигателей работают при высоких частотах вращения и предельных нагрузках. Исходя из перечисленных эксплуатационных требований можно отметить следующие конструкторско-технологические особенности авиационных зубчатых колес:

ажурность конструкции, ее пониженная жесткость;

сложность формы, определяющаяся сочетанием многих конструктивных элементов, зубчатых венцов, шлиц, использованием блочных конструкций, валов-шестерен и т.д.;

использование специальных материалов, имеющих высокие механические свойства и требующих проведения термохимической обработки;

плавность переходов между различными элементами;

низкая шероховатость всех поверхностей (включая свободные), высокая и равномерная твердость рабочих поверхностей. Эти условия обеспечивают надежность работы деталей при знакопеременных и статических нагрузках;

высокие степени точности и технические требования на взаимное расположение рабочих поверхностей относительно конструкторских базовых поверхностей;

применение зубчатых венцов с косыми зубьями, круговым зубом, улучшенным профилем зуба (рис.7.2) и др.

Нормирование точности цилиндрических зубатых колес и передач. Допуски для эвольвентных зубчатых колес и передач с модулем 1 мм регламентированы в ГОСТ 1643-81, который распространяется на зубчатые колеса с исходным контуром по ГОСТ13755-81. В стандарте даны отклонения и допуски для десяти степеней точности: 3–12-й.

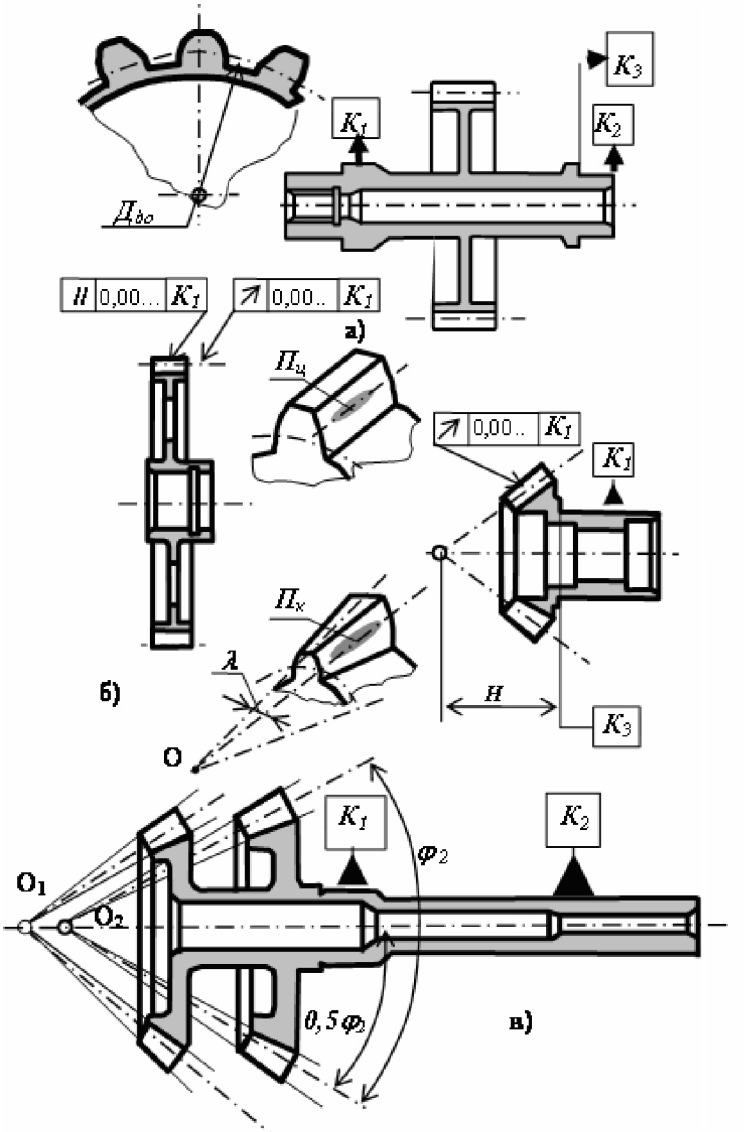


Рис. 7.1. Шестерни приводов агрегатов ГТД

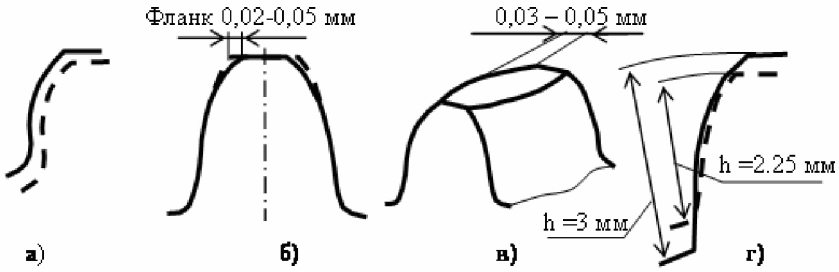


Рис. 7.2 Форма улучшенных зубьев:
а) – корригированный профиль зуба с положительным сдвигом; **б)** фланкированный профиль зуба; **в)** бочкообразный зуб; **г)** удлиненный зуб;
– – – - стандартный зуб.

Понятие «точное колесо» подразумевает высокую точность изготовления тех элементов, которые являются наиболее важными для данных условий эксплуатации колеса. Исходя, из необходимости иметь передачи с определенными эксплуатационными признаками в отношении точности, в стандарте установлены три вида независимых норм: кинематическая точность, плавность работы; контакт зубьев зубчатых колес в передаче. Эти виды норм можно для зубчатых колес и передач можно назначать исходя из разных степеней точности, учитывая характерный признак данных условий эксплуатации и способ обработки.

На комбинирование норм введены специальные ограничения. Нормы плавности работы колеса могут быть не более чем на две степени точнее или на одну степень грубее степени кинематической точности. Нормы контакта зубьев могут быть назначены по любым степеням, более точным, чем нормы плавности работы зубчатых колес и передач, а также на одну степень грубее норм плавности колес и передач.

Кинематическая точность характеризуется полной погрешностью угла поворота за оборот зубчатого колеса. Норма точности по плавности работы определяется погрешностью угла поворота зубчатого колеса, многократно повторенной за его полный оборот. Точность по контакту зубьев оценивается комплексным показателем – суммарным пятном контакта по боковой поверхности зуба.

Боковые зазоры в зубчатой передаче определяются в основном толщиной зуба колеса и отклонением межцентрового расстояния в корпусе. Для разных условий эксплуатации требуются различные боковые зазоры независимо от точности зацепления. В ГОСТ1643-81 преду-

смотрено шесть видов сопряжений (шесть рядов точности), определяющих наименьший (гарантированный) боковой зазор между зубьями H, E, D, C, B, A. Принятые сопряжения обеспечивают то, что при любом угловом положении колес боковой зазор между зубьями будет не меньше гарантированного.

В большинстве случаев принимают передачи с нормальны боковым зазором B.

Видам сопряжений соответствуют виды допуска на боковой зазор (рис. 7.3.) Допускается изменять соответствие между видами сопряжения и допуска бокового зазора.

Требования к точности колес и передачи и к боковому зазору обозначаются одной или тремя цифрами (при комбинировании норм разных степеней точности), например, 7-C ГОСТ1643-81 или 8-7-6 и одной или двумя буквами (при изменении допуска бокового зазора), например, B или Ba. В конце обозначения указывается ГОСТ1643-81.

8 – 7 – 6 – Ba ГОСТ 1643 – 81

Для контроля точности зубчатых колес и передач в разных условиях производства стандартом предусмотрен ряд комплексов контроля, содержащих комплексные и поэлементные показатели для каждой из трех норм точности и вида сопряжения.

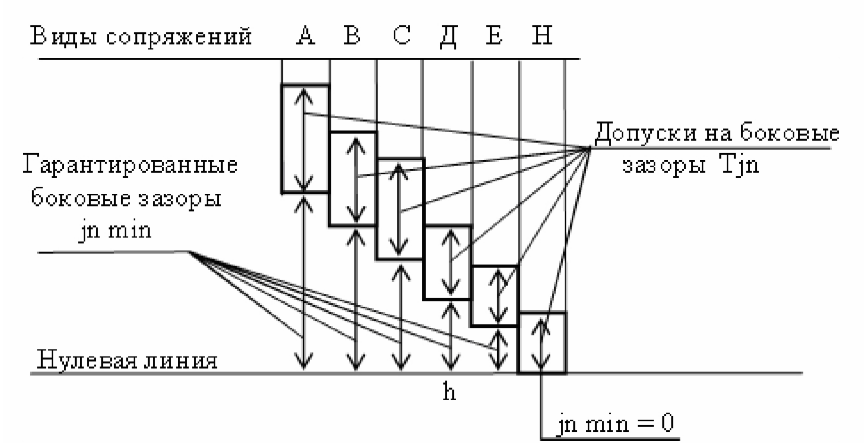


Рис.7.3. Схема расположения допустимых отклонений на различные виды сопряжений зубчатых передач

Зубчатые колеса, применяемые в авиационных двигателях, имеют степень точности 5…8, что требует применения специальных методов обработки, например: для зубчатого колеса 7-й степени точности при модуле m = 2…4 назначаются следующие допуски: на толщину зуба 0,06 мм; на шаг 0,03 мм; на биение зубчатого венца 0,06 мм; на отклонение профиля 0,005 мм.

Зубчатые колеса газотурбинных двигателей изготавливаются из высокопрочных сталей, которые могут быть разделены на три группы в зависимости от применения термической или термохимической обработки.

1) термоулучшаемые стали (закалка, отпуск, твердость 40HRC, 40ХНМА, 37ХН3А.

2) цементируемые стали (цементация + закалка + отпуск, твердость 58HRC, 18ХНВА, 12Х2НВФА, ЭИ712.

3) азотируемые стали (закалка + азотирование, твердость 65HRC, 38ХМЮА, ЭИ415, 20Х3НВФА.

Глубина цементированного слоя задается в пределах 0,7….1,2 мм, а глубина насыщения азотом 0,3…0,6 мм.

Материал зубчатого колеса является важнейшей характеристикой, так как влияет на структуру технологического процесса, выбор метода обработки и т. д.

Наиболее широко в авиадвигателестроении для изготовления зубчатых колес применяют цементируемые стали, так как после цементации, закалки и отпуска они имеют высокую твердость цементированных поверхностей и низкую твердость в основной массе материала. Это обеспечивает высокую контактную прочность поверхности зубьев и значительную ударную вязкость их сердцевины, предохраняющие зубья при вибрационной нагрузке от появления трещин и разрушения.

7.2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

7.2.1. Общие принципы построения технологических процессов

При проектировании технологического процесса решается множество задач, направленных на выполнение требований чертежа в процессе изготовления.

Высокая точность конструкторских и рабочих поверхностей обеспечивается рациональным выбором количества ступеней обработки каждой поверхности, методов обработки и оборудования. Выполнение

требований по точности формы, взаимному расположению поверхностей, обеспечению глубины цементированного и азотированного слоев, равномерности твердости на различных элементах колеса обеспечивается правильным выбором баз, технологической оснастки, рациональным выбором последовательности обработки поверхностей и места термообработок в технологическом процессе, назначением операционных припусков и допусков, разделением технологического процесса на этапы.

Большинство авиационных зубчатых колес имеют достаточно удобные и протяженные поверхности, которые могут быть использованы в качестве установочных баз. Однако важным условием изготовления этих деталей является то, что конструкторские базы (посадочные отверстия, шейки под подшипники и т. п.) и рабочие поверхности (зубчатые венцы) не могут быть обработаны с одной установки (в одной операции). Так как на взаимное расположение этих поверхностей задаются высокие требования, то необходимо стремиться, чтобы зубчатый венец обрабатывался при установке заготовки по конструкторской базе в точное специальное приспособление. Однако иногда такую схему базирования реализовать не удается и в этом случае проводится обработка на постоянной базе (центровые фаски, гнезда или внутренние поверхности). В практике иногда применяется обработка при установке на одну из свободных поверхностей при выверке биения конструкторской базы, но такая схема обработки является нерациональной, так как усложняет наладку операции и резко снижает производительность.

Для обеспечения равномерности по глубине цементированного (или азотированного) слоя на боковых поверхностях зуба в технологическом процессе часто вводят операцию обработки баз (конструкторских поверхностей) при установке по делительной окружности зубчатого венца. Таким же образом поступают и после термообработки.

Место термообработки в технологическом процессе определяется его назначением, видом, формой и размерами зубчатого колеса, а также свойствами материала, из которого оно изготавливается.

В практике в зависимости от конкретных характеристик зубчатого колеса может применяться термообработка исходной заготовки для улучшения обрабатываемости материала, после чернового этапа обработки может проводиться термообработка для снятия внутренних остаточных напряжений, а для формирования заданных характеристик поверхностного слоя – термическая и термохимическая обработка перед окончательным этапом обработки. Так как термообработка оказывает

большое влияние на характеристики технологического процесса (точность, производительность и качество поверхностного слоя), то ее выбор, определение места в технологическом процессе, назначение последующих ступеней обработки поверхностей является важнейшей технологической задачей.

Цементацию поверхностей проводят в конце чистового этапа. При этом защита поверхностей от цементации осуществляется оставлением припуска на нецементируемых поверхностях (которые должны сниматься перед закалкой), или меднением, иногда применяют комбинацию этих двух методов.

Для азотируемых материалов также используют сложный комплекс термообработки, включающий закалку и отпуск после чернового этапа, операции по защите неазотируемых поверхностей путем покрытия их оловом, подготовку поверхности под азотирование, которую проводят в конце чистового этапа.

Подготовка поверхностей под цементацию и азотирование должна обеспечить выполнение следующих основных требований:

высокой точности этих поверхностей, снижающей колебание припуска, снимаемого после термохимической обработки;

минимального биения этих поверхностей относительно конструкторских поверхностей, которые в окончательном этапе должны использоваться в качестве установочных баз; при этом будет обеспечиваться равномерность снимаемого припуска в различных точках поверхности.

Так как в зубчатых колесах термохимической обработке подвергается зубчатый венец и при этом независимо от подготовительной обработки поверхностей происходит коробление заготовки в процессе нагрева, то для обеспечения равномерности припуска, снимаемого при шлифовании зубчатого венца, проводят подготовку (восстановление) установочных баз.

Технологический процесс разбивается на этапы: черновой, чистовой, отделочный. В черновом этапе снимается 60…70% припуска и происходит его выравнивание, готовятся точные базы для чистового этапа обработки.

Чистовой этап обработки позволяет обеспечить заданную форму детали и высокую точность размеров. В этом этапе нарезается зубчатый венец.

В окончательном этапе обеспечиваются все требования чертежа, как по точности, так и по качеству поверхностей.

При проектировании технологического процесса нужно учитывать серийность производства. В современном авиадвигателестроении происходит существенное изменение технологии изготовления деталей на основе снижения серийности, уменьшения незавершенного производства, сокращение производственного цикла и проведение комплектной обработки. Эти требования должны учитываться и при изготовлении зубчатых колес.

7.2.2. Проектирование технологического процесса

На рис. 7.4 показано зубчатое колесо коробки приводов агрегатов высокого давления газотурбинного двигателя: передаваемая мощность до 588кВт (800 л.с.), средняя рабочая температура до 150°С. Характерной конструкторско-технологической его особенностью является сочетание удлиненной пустотелой высокоточной ступицы, облегченного диска и высокоточного зубчатого венца. Материал детали цементируемая сталь 13Х3НВМ2Ф-Ш, имеющая следующие механические характеристики: $\sigma_в$ = 850 Мпа; $\sigma_т$ = 700 МПа; σ_{-1} = 39 МПа; глубину цементации на зубе0,6…0,9 кг, твердость рабочих поверхностей зуба не менее 56 HRC. Особенность материала – склонность к образованию прижогов.

Основные конструкторские базы – поверхности $К_1$ и $К_2$, вспомогательная конструкторская поверхность $К_3$. Эти поверхности имеют высокую точность по диаметру (0,01 мм), а также высокие требования по точности формы поверхности (0,004…0,006 мм), по точности взаимного расположения поверхностей относительно друг друга (взаимное биение 0,02 мм). Рабочие поверхности зубчатого колеса – это зубчатый венец и внешние шлицы. Эти элементы также имеют очень жесткие технические требования, допуск на радиальное биение делительной окружности относительно конструкторских баз не более 0,04 мм; допуск на величину шага зуба 0,007 мм, допустимая погрешность профиля зуба 0,007 мм.

Степень точности зубчатого колеса 6-5-5 ГОСТ1643– 81.

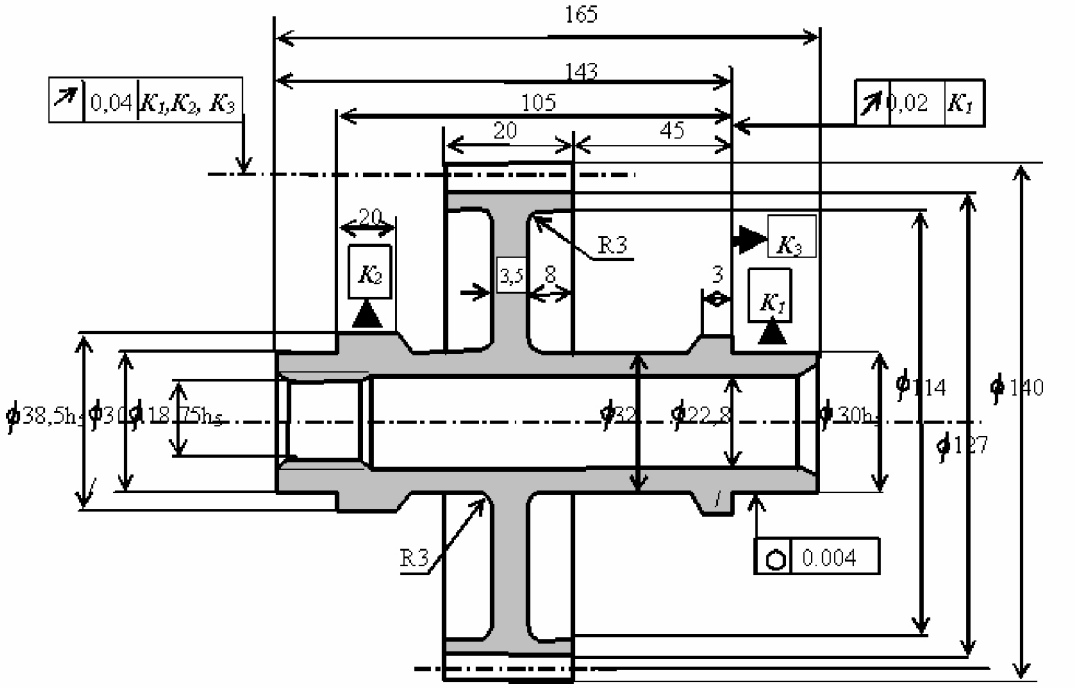


Рис. 7.4. Вал–шестерня коробки приводов ГТД

Определение ступеней обработки поверхностей зубчатого колеса. Количество ступеней обработки для каждой элементарной поверхности определяем из соотношения допусков на заготовку и готовую деталь (определение коэффициента уточнения E_j), а также с учетом необходимости подготовки баз, проведения цементации, защиты поверхностей от цементации. Заготовка для данного зубчатого колеса может бать получена методом горячей штамповки, при этом обеспечивается припуск по диаметрам 5…10 мм (на диаметр) при допуске 1,8…2 мм, а по линейным размерам припуск 5…7 мм (допуск 2,5 мм). Внутреннее отверстие в заготовке не сформировано.

Для определения числа ступеней обработки важно назначить вид и место термообработки в технологическом процессе. Анализ конструкции зубчатого колеса показывает, что при заданных размерах оно будет иметь достаточную жесткость и после чернового этапа деформация обода будет незначительной, поэтому термообработка для снятия внутренних напряжений после чернового этапа может не вводиться. Операции цементации и закалки должны производиться в конце чистового этапа, после нарезания зубчатого венца. Так как после закалки все основные поверхности шлифуются, а данный материал при повышенных температурах склонен к росту зерна, то при абразивной обработке необходимо вводить дополнительно операции низкого отпуска.

С учетом изложенного выше был проведен расчет количества ступеней обработки элементарных поверхностей вала-шестерни. Этапы обработки представлены в табл. 7.1.

Таблица 7.1. – Схема технологического процесса изготовления вала–шестерни

Этап	Назначение
1. Черновой	Формирование контура детали. Выравнивание припуска на точных поверхностях
2. Получистовой	Формирование точных технологических баз, обработка точных поверхностей, выравнивание припуска, нарезание зубчатого венца и шлиц
3. Термохимический	Цементация, закалка
4. Чистовой	Восстановление баз, чистовая обработка конструкторских и рабочих поверхностей
5. Термический	Низкий отпуск
6.Отделочно-упрочняющий	Шлифование конструкторских и рабочих поверхностей, хонингование зуба, гидродробеструйное упрочнение
7. Контрольный	Контроль геометрических параметров и качества поверхностей

Выполнение основных операций при изготовлении валашестерни. При изготовлении зубчатых колес технологический процесс имеет следующие основные операции:

получение заготовки методом горячей штамповки на КГШП;
токарная черновая и чистовая обработка всех поверхностей;
шлифование основных поверхностей;
нарезание зубчатых и шлицевых венцов;
термохимическая обработка и восстановление баз;
отделочная обработка зубчатых венцов и точных поверхностей;
скругление острых кромок;
упрочнение поверхностей.

Токарная обработка поверхностей заготовки может проводиться на различных станках токарной группы. Однако в современном авиадвигателестроении необходимо обеспечивать возможность изготовления деталей в комплекте при малой программе выпуска и минимальном незавершенном производстве. В этих условиях наиболее рациональным становится применение станков с ЧПУ с компьютерной разработкой управляющих программ, гибкостью производственного процесса, быстрой переналадкой оборудования при обработке различных заготовок. При разработке этих операций наиболее важной задачей является правильный выбор технологических баз с учетом обеспечения требований на взаимное расположение конструкторских и рабочих поверхностей, точности выполнения линейных размеров, равномерности снимаемого припуска.

Шлифование поверхностей зубчатых колес проводится на различных круглошлифовальных станках, установка заготовок производится в специальных высокоточных приспособлениях или центрах.

Наибольший интерес представляет **операция шлифования конструкторских базовых поверхностей** при установке заготовки по зубчатому венцу после закалки. При изготовлении точных зубчатых колес одновременно с точной базовой поверхностью обрабатывают опорную технологическую базу для последующего зубошлифования. Заготовку устанавливают в специальный патрон (рис. 7.5), центрирующим заготовку по зубчатому венцу (роликами, рейками, зубчатыми секторами или шариками). Многовенцовые и широкие колес, у которых ширина венца больше диаметра, устанавливаются в патронах, имеющих два самостоятельных центрирующих элемента (двухрядные патроны). В качестве опорной базы заготовки обычно используют торец зубчатого венца, который применялся для базирования заготовки на зуборезном

станке. При обработке нежестких колес используют многокулачковые патроны, в которых уменьшается деформация зубчатого венца и повышается точность обработки.

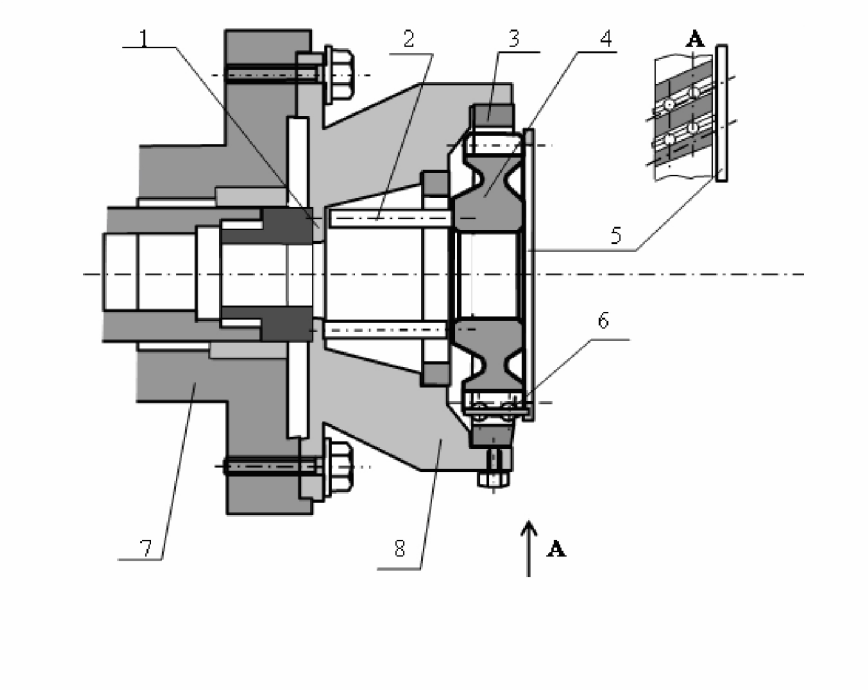


Рис. 7.5 Мембранное приспособление для закрепления заготовки зубчатого колеса при шлифовании базовых поверхностей: 1 – мембрана; 2 – опорные пальцы; 3 – кулачки приспособления; 4 – заготовка; 5 – кольцо сепаратора; 6 – сепаратор; 7 – привод раскрытия патрона; 8 – кольцо.

Операция по нарезанию зубчатого венца шестерни является ответственной и в значительной степени влияет на качество и надежность ее работы. Важным условием при обработке является обеспечение точности эвольвенты и минимального биения зубчатого венца относительно конструкторских баз. Это может быть достигнуто при использовании точной технологической оснастки и инструмента, правильной настройки станка и правильного выбора технологических баз.

Обработка зубчатых колес производится на зуборезных и зубодолбежных станках.

На рис. 7.6 приведен операционный эскиз нарезания зубьев на детали «вал-шестерня». Особенностью детали является то, конструкторские базы (поверхности) достаточно удалены друг от друга и для использования их в качестве установочных баз необходима специальная высокоточная оснастка. Применение такой оснастки позволяет обеспечить равномерность глубины цементационного слоя на зубчатом венце после цементации, закалки, восстановлении баз и чистовой обработки зуба.

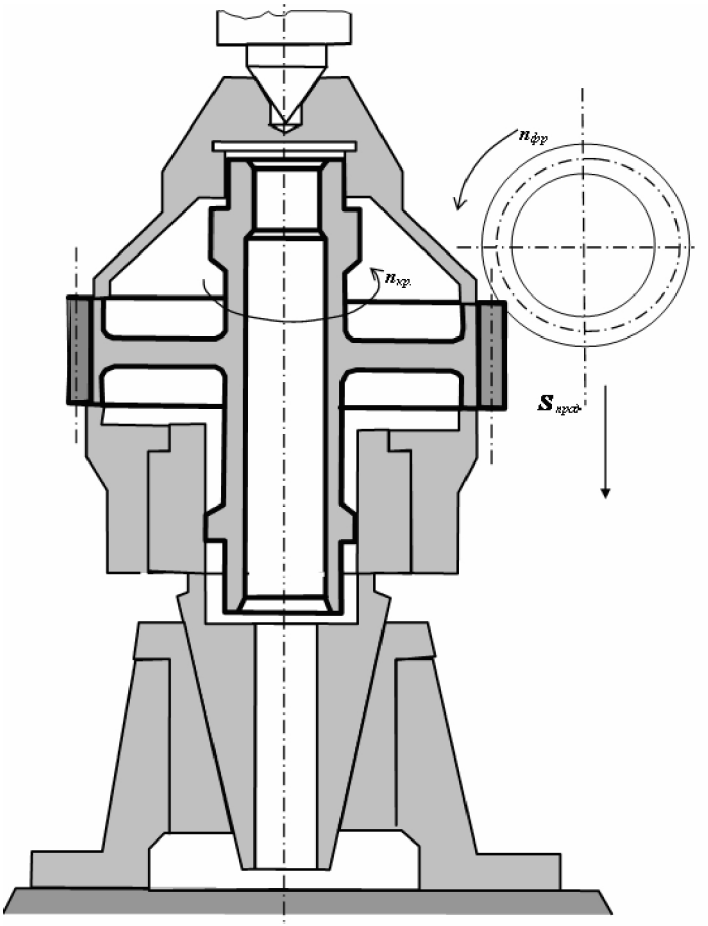


Рис. 7.6. Нарезание зубатого колеса (этап 2)

Для обеспечения надежности работы зубчатого колеса в технологическом процессе предусмотрена **операции дробеструйного упрочнения**, которая проводится на специальной установке с использованием оснастки, обеспечивающей надежную защиту окончательно обработанных поверхностей шестерни (рис. 7.7).

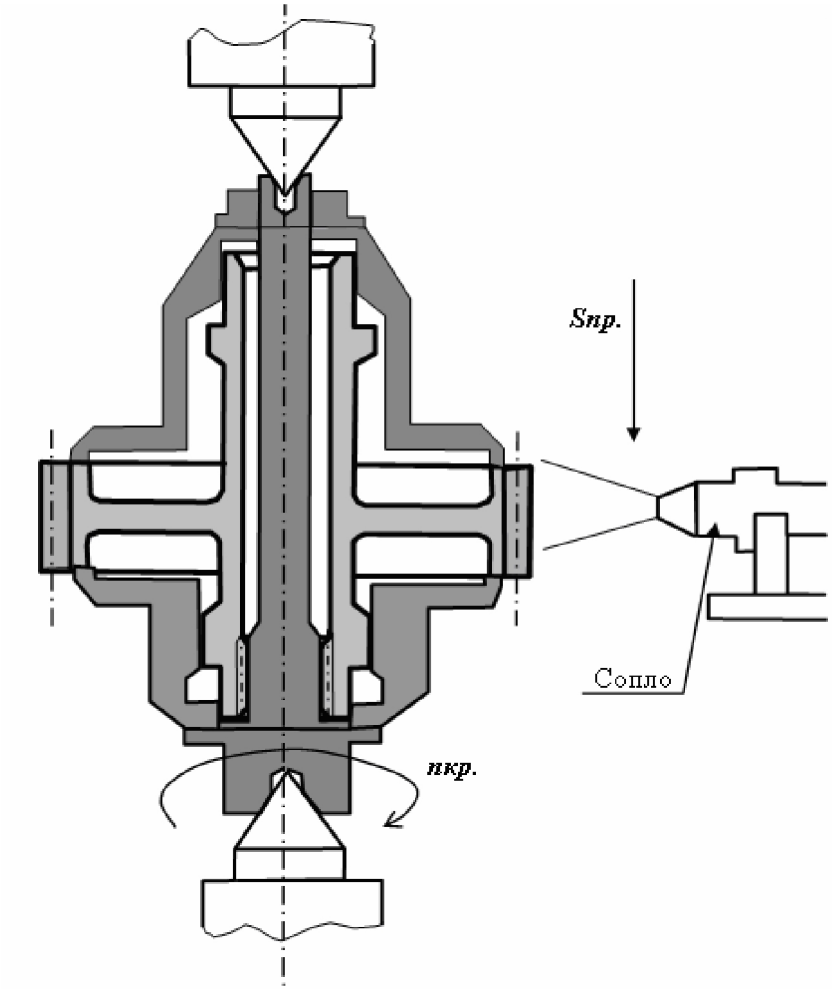


Рис. 7.7. Упрочнение зубчатого венца вала–шестерни

7.2.3 Анализ качественных показателей зубчатого колеса

При построении технологического процесса изготовления зубчатого колеса необходимо обеспечить в пределах заданных значений комплекс взаимосвязанных технических требований и размеров. Для цементируемых зубчатых колес наибольшие трудности возникают по обеспечению требований по биению зубчатого венца относительно конструкторской базы, заданной глубины и равномерности цементационного слоя на всех рабочих поверхностях зубчатого венца и создании необходимой твердости. Эти требования обеспечиваются при построении технологического процесса.

В схеме технологического процесса (табл. 7.1) выделены основные этапы **2–6**, от качества выполнения которых непосредственно зависят вышеперечисленные показатели зубчатого колеса. На рис. 7.8 представлена комплексная схема размерных связей технологического процесса для данных этапов обработки. После нарезания зубчатого венца (операция выполняется на **этапе 2**), осуществляется цементация образующих поверхностей зуба колеса шестерни и закалка (операции выполняются на **этапе 3**). Затем производится восстановление базовой поверхности методом шлифования (см. рис. 7.5). Эта операция выполняется на **этапе 4**. Окончательная обработка зубчатого венца шестерни выполняется на **этапе 6** шлифованием, копированием или обкаткой.

В представленной комплексной схеме размерных связей в качестве замыкающих звеньев принимаются заданные размеры в чертеже детали, которые определяют половину толщины зуба K_1 колеса шестерни и глубины цементационного слоя $Ц$. При выполнении этих размеров твердость на поверхности зуба должна соответствовать заданным значениям в соответствии с техническими требованиями.

В процессе нарезания зубчатого венца на этапе *2* обеспечивается операционный размер A_1, который определяет положение образующей зуба колеса шестерни относительно оси заготовки В качестве оси заготовки в этом случае выступает ось базовой установочной поверхности заготовки, которая формируется на этапе 2 технологического процесса. При выполнении этой операции прорезается впадина и удаляется припуск z_1 с поверхности зуба.

Выполнение термохимических операций осуществляется на этапе 3; при этом производится насыщение поверхностного слоя углеродом (операционный размер $Ц_0$). В процессе выполнения термической операции закалки имеет место коробление заготовки, вызванное термическим воздействием. Это геометрическое изменение заготовки в схеме представлено размером ρ_1.

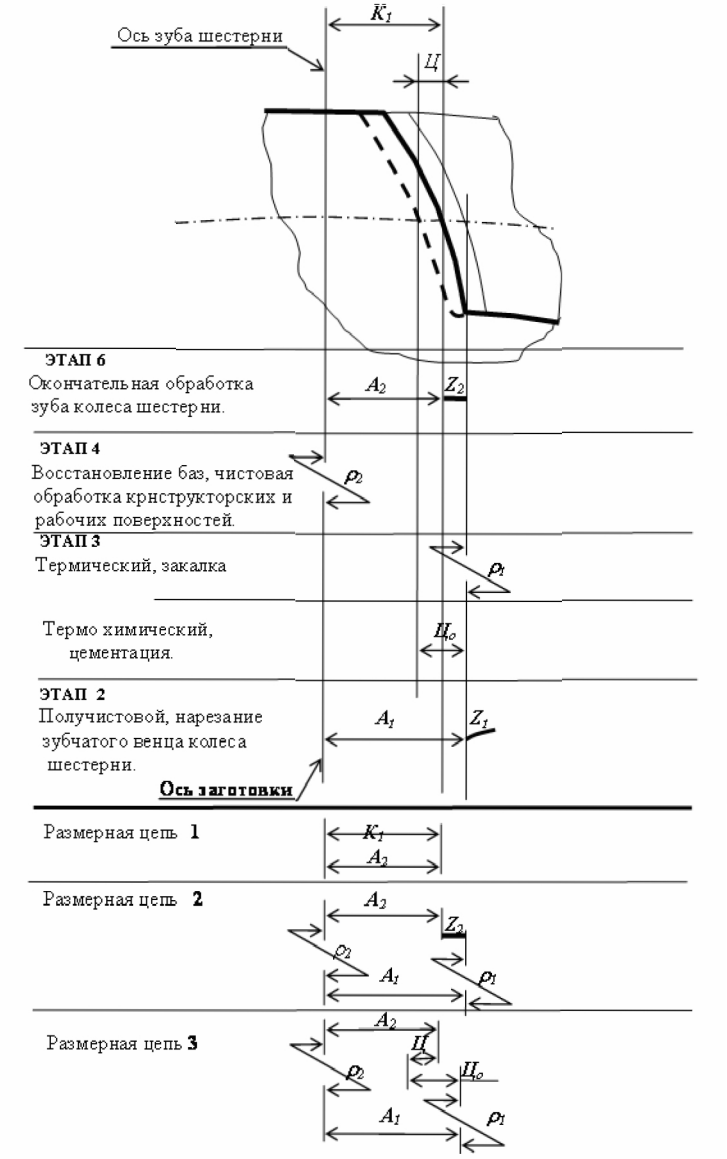


Рис. 7.8. Комплексная схема размерных связей технологического процесса

При восстановлении базовой установочной поверхности (этап 4) основной задачей является создание минимального смещения оси делительной окружности зубчатого венца, полученного после термохимических операций, относительно оси зуба колеса шестерни. Этот размер в комплексной схеме представлен значением ρ_2.

Окончательная обработка зубчатого венца выполняется на этапе 6, на котором методом шлифования обкаткой или другим методом формируются геометрические параметры. На этой операции выполняется размер A_2, а с образующей поверхности зуба удаляется припуск z_2.

В качестве примера рассмотрим выполнение заданных чертежных значений основных параметров зуба по представленной схеме.

Пример 7.1. Дано: K_1 = 1,8 ± 0,00125мм ($2K_1$ = 3,6 ± 0,0025 мм), $Ц$ = 0,6…0,9 мм.

Из технологического процесса известны также:

$Ц_о$ = 0,8…1,0 мм; ρ_1 = 0 + 0,15 мм; A_2 = 1,8 ± 0,00125 мм;

A_1 = 1,92 ± 0,005 мм; ρ_2 = 0+ 0,02 мм.

Решение 1. Примем условие: в технологическом процессе применяется операция восстановления базовой установочной поверхности на этапе 4.

Рассмотрим три размерные цепи (рис. 7.8).

Цепь 1 определяет выполнение заданного размера K_1.

Общее уравнение размерной цепи:

$$K_1 - A_2 = 0; \tag{7.1}$$

уравнение замыкающего звена:

$$K_1 = A_2. \tag{7.2}$$

Необходимые условия: равенство размеров и заданных значений допустимого отклонения ($\omega_{A2} \le T_{A2\omega}$), выполнены (см. исходные данные).

Цепь 2 определяет величину удаляемого припуска с образующей поверхности зуба при выполнении чистового этапа 6 обработки.

Общее уравнение размерной цепи:

$$A_2 + Z_2 \pm \rho_1 - A_1 \pm \rho_2 = 0; \tag{7.3}$$

уравнение замыкающего звена:

$$Z_2 = \pm \rho_1 + A_1 \pm \rho_2 - A_2, \tag{7.4}$$

В примере ρ_1 = 0, так как на операции восстановления базовой установочной поверхности этот параметр устраняется. Тогда уравнение замыкающего звена имеет вид:

$$Z_2 = A_1 \pm \rho_2 - A_2,$$

или $Z_{2\,min} = A_{1\,min} - \rho_{2\,max} - A_{2\,max}$,

тогда $Z_{2\,min}$ = 1,915 – 0,02– 1,80125 = 0,09375 мм.

$$Z_{2\,max} = A_{1\,max} + \rho_{2\,max} - A_{2\,min},$$

тогда $Z_{2\,max}$ = 1,925 + 0,02 – 1,79875 = 0,14625 мм.

На основании прил. 3 и в соответствии с расчетными значениями удаляемых припусков с образующей поверхности зуба определим максимальную твердость на поверхности зуба колеса шестерни 62_HRC , минимальная твердость на поверхности 57 HRC .

Цепь 3 определяет глубину цементационного слоя Ц на образующей поверхности зуба колеса шестерни. Общее уравнение размерной цепи:

$$A_2 - Ц + Ц_о \pm \rho_1 - A_1 \pm \rho_2 = 0.$$

Так как $\rho_1 = 0$,

$$A_2 - Ц + Ц_о - A_1 \pm \rho_2 = 0.$$

Уравнение замыкающего звена:

$$Ц = Ц_о - A_1 \pm \rho_2 + A_2;$$

Тогда, $Ц_{max} = Ц_{o\,max} - A_{1\,min} + \rho_{2\,max} + A_{2\,max}$;

$$Ц_{\,max} = 1 - 1{,}915 + 0{,}02 + 1{,}80125 = 0{,}90175 \text{ мм};$$

$$Ц_{\,min} = Ц_{o\,min} - A_{1\,max} - \rho_{2\,max} + A_{2\,min},$$

$$Ц_{\,min} = 0{,}8 - 1{,}925 - 0{,}02 + 1{,}79875 = 0{,}65375 \text{ мм}.$$

Расчетные данные глубины цементационного слоя показывают, что они близки к заданным чертежным значениям.

Решение 2. Примем условие: в технологическом процессе отсутствует операция восстановление базовой установочной поверхности (этап 4).

Рассмотрим три размерные цепи (см. рис. 7.8).

Цепь 1 определяет выполнение заданного конструкторского размера K_1. Общее уравнение размерной цепи (7.1) или уравнение замыкающего звена (7.2).

Необходимые условия, равенства размеров и заданных значений допустимого отклонения ($\omega_{A2} \le T_{A2\omega}$), в нашем примере выполнены (см. исходные данные)

Цепь 2 определяет величину удаляемого припуска с образующей поверхности зуба при выполнении чистового этапа (этапа 6) обработки.

Общее уравнение размерной цепи (7.3), а равнение замыкающего звена (7.4).

В примере $\rho_2 = 0$, так как отсутствует операция восстановления базовой поверхности. Тогда уравнение замыкающего звена

$$Z2 = A1 \pm \rho 1 - A2,$$

или $Z_{2\,min} = A_{1\,min} - \rho_{1\,max} - A_{2\,max}$.

Тогда $Z_{2\,min} = 1{,}915 - 0{,}15 - 1{,}80125 = -0{,}03625$ мм;

$$Z_{2\,max} = A_{1\,max} + \rho_{1\,max} - A2\ min,$$

$$Z_{2\,max} = 1{,}925 + 0{,}15 - 1{,}79875 = 0{,}27625 \text{ мм}.$$

На основании прил. 3 и в соответствии с расчетными значениями удаляемых припусков с образующей поверхности зуба определим максимальную твердость на поверхности зуба 63 HRC, минимальная твердость на поверхности 52,5 HRC (точка 4').

Цепь 3 определяет глубину цементационного слоя $Ц$ на образующей поверхности зуба колеса шестерни.

Общее уравнение размерной цепи (7.5).

Так как $\rho_2 = 0$;

$$A_2 - Ц + Ц_о - A_1 \pm \rho_1 = 0.$$

Уравнение замыкающего звена:

$$Ц = Ц_о - A_1 \pm \rho_1 + A_2.$$

Тогда $Ц_{max} = Ц_{o\,max} - A_{1\,min} + \rho_{1\,max} + A_{2\,max}$;

$$Ц_{max} = 1 - 1{,}915 + 0{,}15 + 1{,}80125 = 1{,}03175 \text{мм},$$

$$Ц_{min} = Ц_{o\,min} - A_{1\,max} - \rho_{1\,max} + A_{2\,min},$$

$$Ц_{min} = 0{,}8 - 1{,}925 - 0{,}15 + 1{,}79875 = 0{,}52375 \text{ мм}.$$

Расчетные данные глубины цементационного слоя показывают, что имеет место нарушения заданных чертежных значений цементационного слоя.

Из представленного примера видно, что качественные показатели венца зубчатого колеса непосредственно зависят от качества выполнения операций технологического процесса и их обоснованного применения.

7.2.4. Изготовление цилиндрических колес с внутренними зубьями

Колеса с внутренними зубьями классифицируются следующим образом:

по конструкции – с односторонним валом, насадные;

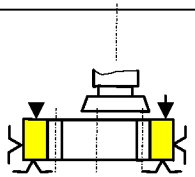
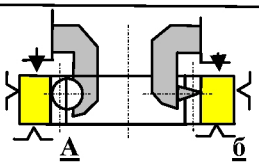
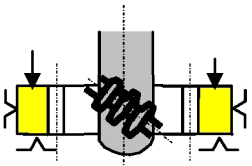
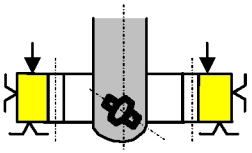
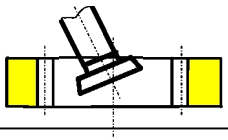
по числу венцов – одно– и многовенцовые (у многовенцовых один или несколько венцов могут быть с внешними зубьями);

по форме зуба – прямозубые и косозубые.

Конструктивные особенности колеса с внутренними зубьями накладывают ограничения на методы их обработки. Колеса с закрытыми венцами обрабатывают в основном на зубодолбежных станках, при этом должна быть обеспечена минимальная ширина канавки для выхода долбяка при обработке.

Отдельные методы обработки колес с внутренними зубьями приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2. – Методы обработки колес с внутренними зубьями

Метода обработки	Эскиз	Станки, инструмент
Долбление		Зубодолбежные универсальные станки, зуборезные долбяки всех типов
Фрезерование	 **а –** дисковая, модульная фреза; **б –** пальцевая модульная фреза.	Зубофрезерные станки с накладной головкой
Фрезерование		Зубофрезерные станки с накладной головкой, червячная фреза
Обкатка обкаточным инструментом		Зубофрезерные станки, одновитковая фреза улитка
Зуботочение		Станки для зуботочения, многозаходная обкатная головка

При обработке заготовок колес с внутренними зубьями учитывают специфику назначения технологических баз для зубообработки. Метод нарезания внутренних зубьев выбирают с учетом производительности и себестоимости обработки.

7.2.5. Особенности обработки базовых поверхностей зубчатых колес после термической обработки

При анализе глубины цементации и твердости на поверхности зубьев установлено, что на качественные показатели зубчатого венца существенно влияет равномерность удаляемого припуска по образующей зуба. Этот слой определяется производственными погрешностями, возникающими как на операции по формированию профиля зуба до термической обработки, так и после нее. Существенные изменения происходят в процессе проведения термических операций (цементации, закалки, отпуска), так как возникающие изменения геометрических параметров заготовок в виде коробления смещают положение зубчатого венца шестерни относительно первоначального. Особенно это проявляется при изготовлении маложестких ажурных конструкций зубчатых колес.

Используемые различные технологические приемы при термических операциях (например закалка в штампах или правка заготовок после термической операции) позволяют частично уменьшить эти погрешности, но устранить их полностью не представляется возможным.

В связи с этим, для уменьшения погрешности расположения зубчатого венца шестерни относительно базовых поверхностей при механической обработке используются различные конструкции станочных центрирующих приспособлений. Основная цель применения этих приспособлений направлена на уменьшения влияния погрешностей, полученных на предварительных этапах обработки на последующую обработку.

На рис. 7.9 представлена схема установки конической прямозубой шестерни в технологической системе станка при восстановлении базовых поверхностей (отверстия и торца). Заготовка устанавливается по трем шарикам (или шаровым элементам) *5* относительно делительного конуса шестерни, обеспечивая при этом беззазорный контакт установочных шариков с этим конусом. Крепление заготовки по торцу обеспечивает самоцентрирование ее с минимальным смещением относительно конусной образующей втулки *2*. Перед установкой заготовки в

такое приспособление осуществляется выверка положения образующей поверхности втулки относительно оси вращения шпинделя *1* станка. После установки заготовки производится шлифование базового отверстия и прилегающего опорного торца. Такой способ установки позволяет уменьшить производственные погрешности до минимальных значений.

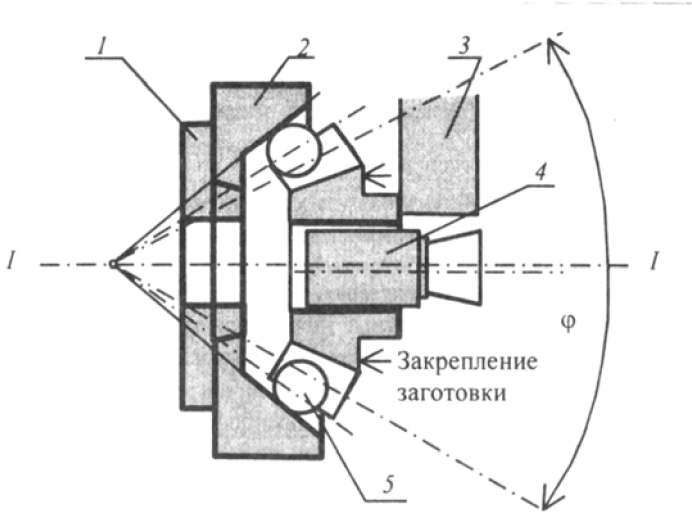


Рис. 7.9. Схема подготовки базовых поверхностей конического зубчатого колеса после термической обработки:
1 – шпиндель шлифовального станка; *2* – втулка центрирующего приспособления; *3* – шлифовальный круг; *4* – шлифовальный круг для обработки отверстия; *5* – центрирующий шарик для ориентирования заготовки; *I* – ось шпинделя станка и делительного конуса колеса

Необходимо отметить, что приспособления такого типа весьма эффективно центрируют заготовки при малых углах делительного конуса φ. При значительных углах делительного конуса используется выверка заготовки, предварительное формирование центрирующих фасок и других приемов.

Подобные схемы центрирования заготовок используются при центрировании в технологической системе станка, при восстановлении базовых поверхностей и для цилиндрических шестерен. В этом случае в

качестве установочных элементов приспособления выступают три ролика, которые обеспечивают контакт с заготовкой по делительной окружности шестерни. Центрирование этого «блока» выполняется с помощью специального станочного приспособления. Элемент центрирования может быть выполнен в виде муфты обгона, мембранного патрона или другого устройства.

Операция **окончательного контроля** зубчатых колес производится в зависимости от назначения передачи.

Комплексы показателей, проверяемые при приемочном контроле, устанавливают изготовители в зависимости от применяемой технологии и принятой общей системе контроля. При выборе комплексов необходимо руководствоваться данными, представленными в таблице 7.3.Основные технические требования к приборам для измерения цилиндрических зубчатых колес приведены в ГОСТ 5368-81.

Таблица 7.3. – Нормы для контроля зубчатых колес

Нормы	Прямозубые и узкие косозубые колеса		Широкие косозубые колеса
	Степени точности		
	4 –6	6 –8	3 – 8
Кинематическая точность	Наибольшая кинематическая погрешность	Колебание межосевого расстояния за один оборот	Радиальное биение зубчатого венца
Плавность работы	Отклонение шага зацепления. Погрешности профиля	Колебание межосевого расстояния на одном зубе	Циклические погрешности зубчатого колеса
Контакт зубьев	Отклонение направления зуба	Пятно контакта	Пятно контакта. Отклонение осевых шагов. Отклонение шага зацепления.
Боковой зазор	Отклонение средней длины общей нормали	Отклонение средней длины общей нормали	Смещение исходного контура

Кроме проверки основных геометрических параметров зубчатого колеса (толщины зуба, шага, длины общей нормали и т. д.), производится контроль положения зубчатого венца относительно конструкторских поверхностей, качества поверхности, кинематической погрешности зубчатого колеса.

Измерение кинематической погрешности производится на электронном приборе. Кроме зубчатой пары, включающей проверяемое и измерительное колесо, имеются преобразователи (датчики) углов поворота, электронное считывающее устройство, блока настройки на заданное передаточное отношение, блока сравнения поворотов колес, образующих зубчатую пару, блок формирования импульсов, а также показывающее и регистрирующее устройства.

ГЛАВА 8
КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

8.1. ВИДЫ, СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

К новым конструкционным материалам, которые по прочности, жесткости и другим физико-механическим свойствам значительно превосходят известные конструкционные сплавы, относятся так называемые композиционные материалы (КМ) – композиты.

Композиционные материалы – это материалы образованные объемным сочетанием химически разнородных и нерастворимых друг в друге компонентов с четкой границей раздела между ними. КМ характеризуются свойствами, которыми не обладает ни один из его компонентов, взятый в отдельности. Обычно КМ состоят из пластичной основы (матрицы), служащей связующим материалом, и включений различных компонентов (наполнителя) в виде порошков, волокон, нитевидных кристаллов, тонкой стружки и т.п.

Варьируя объемное содержание компонентов, можно получить КМ с требуемыми свойствами материала, и даже разными в различных направлениях. В зависимости от направления ориентации наполнителя в материале (анизотропия свойств КМ) это различие свойств КМ является регулируемым: можно создавать КМ под конкретную конструкцию в соответствии с действующими нагрузками и особенностями ее эксплуатации. Соответствующим образом спроектированная и изготовленная конструкция из КМ может быть более совершенной, чем выполненная из металла. Само создание изделий из КМ является примером единства конструкции и технологии, поскольку материал создается одновременно с изделием. Свойства КМ в значительной степени зависят от параметров технологического процесса.

Вместе с тем специфика КМ, в частности низкие прочность и жесткость при сдвиге, требует внимательного отношения к конструктивно-технологической отработке конструкции: расчету сложных многослойных систем, сохранению в изделии высоких прочностных свойств армирующих волокон, получению стабильных характеристик КМ.

В зависимости от **материала матрицы** различают КМ: **полимерные** (ПКМ), **металлические** (МКМ), **керамические** (ККМ), **углерод-дугродные** (УУКМ).

В качестве матрицы в КМ используют эпоксидные, кремнийорганические, полиэфирные и другие смолы, соответственно алюминий, магний, титан, никель, жаропрочные сплавы и другие металлы, а также керамику и углерод различной модификации.

Матрица в КМ выполняет функцию среды, в которой распределен наполнитель. Податливая матрица, заполняющая межволоконное пространство, обеспечивает совместную работу отдельных волокон за счет собственной жесткости и взаимодействия, существующего на границе раздела матрица–волокно.

Наполнитель в КМ воспринимает основные напряжения, возникающие в композиции при действии внешних нагрузок, придавая ей прочность и жесткость в направлении ориентации волокон. Арматура в КМ может быть любой природы и иметь любую форму поверхности – непрерывные и дискретные волокна, чешуйки, микросферы, порошки и т. п. В современной технике наиболее широко применяют непрерывные высокопрочные волокна, которые обеспечивают наиболее высокие механические характеристики получаемого КМ. Чаще всего используют стеклянные, органические, углеродные, борные и различные металлические волокна.

Работоспособность композиционного материала обеспечивается как правильным выбором и сочетанием матрицы и наполнителя, так и рациональной технологией их совмещения, призванной обеспечить прочную связь между ними.

Волокнистые наполнители. ***Стеклянные волокна***. Основными компонентами химического состава стеклянных волокон являются взаимнорастворимые оксиды кремния, магния, алюминия, титана, кальция, натрия и т. п. Непрерывные стеклянные волокна получают из расплавленной стекломассы вытягиванием струи через небольшие отверстия (фильеры) со скоростью до 20 м/с. Диаметр вытянутых элементарных волокон составляет 7...12 мкм. Некоторое число этих волокон объединяется в первичную нить с одновременным нанесением замасливателя, который облегчает дальнейшую переработку волокна и защищает его от истирания и воздействия влаги. Первичные нити наматываются на бобины и используются непосредственно при получении КМ или для получения тканей, лент, рубленых волокон. Перед формированием из-

делий из стеклопластика замасливатели стекловолокон обычно удаляют химическим или термическим путем.

Прочность стеклянных волокон существенно зависит от температуры и их использование в композиционных материалах ограничено температурой около 550...700 К.

Модуль упругости волокон с повышением температуры уменьшается незначительно, вплоть до температуры размягчения.

Стеклянные волокна при изготовлении изделий из КМ используются в виде первичных нитей, ровингов (некрученый жгут), крученых нитей и тканей на их основе. В процессе переработки стеклянных волокон заметно снижаются прочностные характеристики изделий. В частности, некрученые нити и жгуты позволяют реализовать в готовых изделиях до 75% прочности элементарных волокон, крученые – до 60%, а в тканях этот показатель еще ниже.

Органические волокна. Высокопрочные и высокомодульные органические волокна были получены в начале 70-х годов XX века на основе ароматических полиамидов: типа СВМ в СССР и «РКВ-49» (Кевлар) в США. К этой группе относятся и термостойкие с температурой 573...1673К волокна типа «терлон». При указанной рабочей температуре эти волокна сохраняют до 50% начальной прочности.

В зависимости от состава полимера и метода формования получают органические волокна, имеющие плотность 1410...1450 кг/м^3, прочность при растяжении 1,8...3,5 Гпа, модуль упругости 70...140 ГПа.

Органическое волокно термостабильно вплоть до температуры 453°К. Оно сохраняет свои высокие механические характеристики при криогенных температурах. Однако при 573К прочность органопластиков падает на 50%.

Углеродные волокна. В качестве исходного сырья для получения углеродных волокон используют высокопрочное гидратцеллюлозное волокно (ГЦ-волокно) или полиакрилонитрильное волокно (ПАН-волокно). Основными стадиями технологического процесса получения углеродных волокон (на основе органических) являются пиролиз при 500...650К, карбонизация при 1200...1700К и графитизация при температуре от 1200...1800 до 2900...3100°К. В последние годы для производства углеродных волокон начинают использовать более дешевые и доступные виды сырья (нефтяной пек, лигнин, фенольные смолы). Основными преимуществами углеродных волокон являются: исключительно высокая термостойкость, сравнительно низкая плотность высокие

прочность и жесткость, почти нулевой коэффициент линейного расширения, высокая химическая стойкость.

В зависимости от условий получения и типа исходного сырья прочность и модуль упругости углеродных волокон находятся соответственно в пределах 1...3,5 и 195...700 ГПа.

Механические характеристики углеродных волокон сохраняются неизменными при повышении температуры до 723К.

Металлические армирующие наполнители. ***Борные волокна.*** Основным промышленным способом производства борного волокна является газофазное осаждение поликристаллического бора из смеси треххлористого бора и водорода на разогретую до температуры 1373К вольфрамовую подложку – проволоку диаметром 12...16 мкм. При таком процессе вокруг подложки формируется борная оболочка, частично прореагировавшая с материалом подложки.

Промышленностью выпускаются борные волокна диаметром 100...200 мкм, имеющие временное сопротивление при растяжении 2...4 ГПа, модуль упругости 370...430 ГПа, плотность 2500... 2700 кг/м^3. Освоен выпуск однонаправленных лент шириной до 76 мм и тканей шириной 1,5 м.

Борные волокна хорошо совмещаются с полимерной и металлической матрицами. Они легко пропитываются связующими и, уплотняясь в процессе формования, обеспечивают высокое (до 70 % по объему) содержание армирующего компонента в композиционном материале.

К недостаткам борных волокон следует отнести сложность их переработки, невозможность выполнить укладку волокон на малых радиусах изгиба, а также резкое падение механических характеристик при температурах выше 673К в результате окисления бора. Армирование КМ повышает временное сопротивление разрыву, предел прочности, предел текучести, модуль упругости, расширить температурный интервал эксплуатации и т.п. В качестве армирующих волокон помимо металлических и борных наиболее широко используют керамические волокна карбида кремния, волокна оксида алюминия и двуоксида циркония. Для армирования КМ применяют металлические волокна из бериллия, вольфрама, титана и стали. Перспективно использование в качестве наполнителя различных нитевидных кристаллов.

Полимерные связующие компоненты. Полимерная матрица (связующее) является важнейшим компонентом КМ, определяющим его технологические и эксплуатационные свойства. В производстве конструкций наибольшее значение имеют связующие, представляющие со-

бой низковязкие или легкорастворимые продукты, – **термореактивные смолы**. Они способны затвердевать под действием отвердителей, катализаторов или инициаторов отверждения. При затвердевании таких связующих в процессе формования необратимо фиксируется форма конструкции. Поэтому тип связующего и процессы, протекающие при его затвердевании, определяют условия получения КМ и свойства конструкции из него.

Эффективная работа композиционного материала во многом зависит от правильного выбора пары наполнитель–матрица. Каждому типу волокон должно соответствовать свое связующее, обладающее определенными физико-механическими характеристиками. Природа матрицы определяет уровень рабочих температур композита, характер изменения свойств при воздействии внешней среды, химическую стойкость, частично теплофизические и другие свойства. Практически жиспользуются универсальные связующие, хорошо взаимодействующие с рядом органических и минеральных волокон.

В любом случае полимерное связующее как основной компонент КМ, должно выполнять следующие функции:

обеспечивать монолитность материала,

передавать внешнюю нагрузку на арматуру и перераспределять ее между отдельными волокнами,

воспринимать сдвиговые усилия,

предохранять волокна от механических повреждений, истирания и химического воздействия внешней среды.

К числу термореактивных связующих материалов, которые применяются для изготовления конструкций современной техники, относятся эпоксидные, полиэфирные, фенольные, кремнийорганические и другие смолы. Лучшими из термореактивных связующих материалов являются эпоксидные смолы. Они чаще всего находят применение в практике, так как обладают высокими механическими характеристиками. Эти материалы обладают хорошей смачиваемостью и адгезией к волокнам, легко затвердевают при нормальной и повышенной температурах без применения внешнего давления, в автоклавах, имеют малую усадку (1,0...1,5%), малое содержание пор (1,0...3%).

Связующие материалы на основе полиэфирных и фенольных смол по основным показателям уступают эпоксидным, но они более дешевы и поэтому используются для изготовления менее нагруженных и менее ответственных конструкций.

В последние годы резко возрос интерес к полиамидным связующим, сочетающим в себе высокую прочность, теплостойкость и химическую стойкость. Эти смолы могут применяться при температуре до 673К и являются наиболее перспективными для углепластиков.

Металлические матрицы. Наиболее широко в качестве матричного материала для КМ используются алюминиевые сплавы, что объясняется удачным сочетанием в них физико-механических и технологических свойств. Алюминий имеет плотность 2700 кг/м^3, температуру плавления 1053К, химически инертен к большинству волокнистых материалов, применяемых для производства КМ.

Сплавы алюминия способны подвергаться разнообразным видам пластического деформирования, литья, операциям порошковой металлургии, на которых основываются различные способы изготовления изделий из композиционных материалов на металлической матрице.

По технологическому признаку алюминиевые матрицы можно разделить на несколько типов: деформируемые, литейные, порошковые. К деформируемым алюминиевым сплавам относятся неупрочняемые термической обработкой алюминиево-магниевые и алюминиево-марганцевые сплавы марок АМг, АМц и др. Эти сплавы обладают хорошей пластичностью, но сравнительно невысокой прочностью. Большую механическую прочность имеют упрочняемые термической обработкой дуралюмины (Д1, Д6, Д16 и др.).

Распространенными литейными сплавами являются силумины, обладающие хорошими литейными свойствами. В то же время эти сплавы малопластичные, имеют низкие ударную вязкость и теплостойкость.

Жаропрочной матрицей является материал типа САП (спеченный алюминиевый порошок), который получается методом порошковой металлургии, САП при температуре 773К сохраняет прочность при растяжении порядка 80...120 МПа. Такие свойства материал получает за счет упрочнения его оксидом алюминия (от 6 до 17%).

8.2. ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Важнейшими из композитов являются КМ с полимерной матрицей, упрочненной волокном. Многообразие армирующих волокон полимерных связующих, а также схем армирования позволяет направленно регулировать свойства ПКМ, наиболее полно отвечающие характеру и условиям работы конструкций из них.

В отношении способа армирования можно выделить две основные группы материалов: 1) композиционные материалы, сформированные из слоев, образованных параллельными непрерывными волокнами, 2) композиты, армированные тканями.

Композиционные материалы, армированные однонаправленными наполнителями. Конструкция, изготовленная на КМ, представляет, как правило, многослойную волокнистую систему, в которой каждый слой состоит из однонаправленных жгутов, лент, нитей и т.п., расположенных относительно друг друга определенным способом. При проектировании изделий из КМ рассчитывают углы укладки армирующих волокон в каждом слое, согласуя поле напряжений и деформаций в изделии с полем механических характеристик КМ.

При этом учитывают, что наиболее высокие показатели механических характеристик КМ достигаются, когда напряжения в конструкции действуют вдоль волокон, а наименьшие – поперек волокон. Механические и другие свойства изделий со сложной схемой армирования поддаются расчету и определяются свойствами отдельных однонаправленных слоев, их толщиной, заданным углом ориентации волокон в каждом слое и структурой всего пакета. Для экспериментальной оценки свойств однонаправленного материала широко применяются кольцевые образцы.

Объемное содержание волокна имеет свои для каждого материала оптимальные значения, равные 0,7...0,72 (для стеклопластика и бороластика) и 0,6...0,65 (для органо– и углепластиков).

Большинство однонаправленных КМ при сжатии в направлении вдоль волокон ведут себя как упругие тела, подчиняющиеся закону Гука вплоть до разрушения материала. Модули упругости при растяжении и сжатии таких материалов имеют одинаковое значение. У большинства ПКМ прочность при растяжении выше, чем при сжатии, за исключением бороластиков. Основной недостаток рассматриваемых ПКМ – их низкие механические свойства при поперечном нагружении и сдвиге, обусловленные недостаточной прочностью матрицы и связи на границе раздела компонентов.

Композиционные материалы, армированные тканями. Большинство применяемых волокон (исключение составляют борные волокна) в результате текстильной переработки позволяют получить ткани, которые широко используются в КМ в качестве армирующих наполнителей. Основным преимуществом тканых материалов является простота их использования, особенно при изготовлении крупногабаритных изделий.

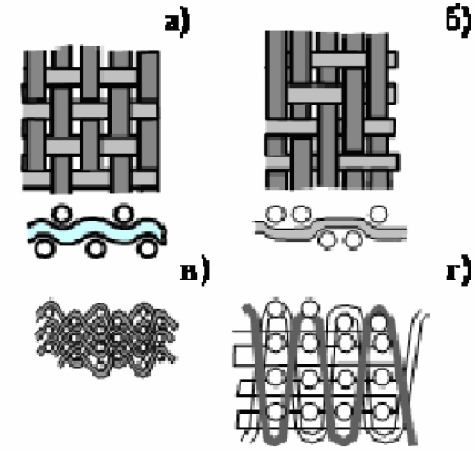


Рис.8.1. Расположение нитей основы в тканях различного плетения: однослойных: а) полотняного, б) сатинового и многослойнх в) с соединением сосених слоев в процессе ткачества г) с соединением всех слоев ткани перевязочной нитью основы

В производстве композитов на основе тканей применяются, как правило, ткани полотняного и сатинового переплетения. В конструкциях, подверженных значительным межслойным сдвиговым нагрузкам хорошо зарекомендовали себя ткани объемного плетения, состоящие из нескольких слоев, последовательно обьединяемых общими нитями. Такие структуры показаны на рис. 8.1.

Ткани вырабатываются из крученых текстильных нитей и жгутов и характеризуются схемой плетения, плотностью нитей на единицу длины и ширины, массой единицы площади, а также некоторыми другими параметрами. Механические свойства композитов, армированных тканями, зависят как от типа волокон, вида плетения, так и от соотношения волокон по основе и утку ткани.

Методы получения ПКМ. Отличительная особенность изготовления деталей из ПКМ, как уже отмечалось, состоит в том, что материал и изделие в большинстве случаев создаются одновременно. При этом изделию сразу придают заданные геометрические размеры и форму, что позволяет существенно снизить его стоимость и сделать конкурентоспособным с изделиями из традиционных материалов, несмотря на сравнительно высокую стоимость полимерных связующих и волокнистых наполнителей.

Технология изготовления деталей из ПКМ включает следующие основные операции:

1) подготовка армирующего наполнителя н приготовление связующего;

2) совмещение арматуры и матрицы;

3) формообразование детали;

4) затвердевание связующего компонента в КМ;

5) механическая доработка детали;

6) контроль качества детали.

Подготовка исходных компонентов заключается в проверке их свойств на соответствие техническим условиям, а также в обработке поверхности волокон для улучшения их смачиваемости и увеличения прочности сцепления между наполнителем и матрицей в готовом ПКМ (удаление замасливателя, аппретирование, активирование поверхности, химическая очистка поверхности, удаление влаги и т.п.).

Совмещение армирующих волокон и связующего компонента может осуществляться прямыми или непрямыми способами.

К прямым способам относятся такие, при которых изделие формуется непосредственно из исходных компонентов КМ, минуя операцию изготовления из них полуфабрикатов. Непрямыми способами изготовления называются такие, в которых элементы конструкции образуются из полуфабрикатов. В этом случае пропитка армирующих волокон связующим компонентами представляет самостоятельную операцию, в результате которой получают предварительно пропитанные материалы (предпреги) – нити, жгуты, ленты и ткани, которые затем подсушиваются и частично затвердевают. Препреги приготовляют в специальных установках вертикального или горизонтального типа, одна из которых представлена на рис. 8.2.

Формообразование деталей современной техники из ПКМ осуществляется по различным технологиям, из которых наиболее широкое применение находят методы намотки, прессования, вакуумное и автоклавное формование, пултрузия.

Метод намотки. Намоткой называют процесс формообразования конструкций из КМ, при котором заготовки получают автоматизированной укладкой по заданным траекториям движения армирующего наполнителя (нитей, лент, тканей). Данные конструкции обычно пропитываются полимерными связующими компонентами при вращении формы или технологической оправки.

Оправки или формы имеют конфигурацию и размеры, соответствующие внутренним размерам изготавливаемой детали. Формование детали намоткой завершается отвердением намотанной заготовки. Оправка после этого обычно удаляется, хотя в отдельных случаях она может оставаться и выполнять функцию конструктивного элемента.

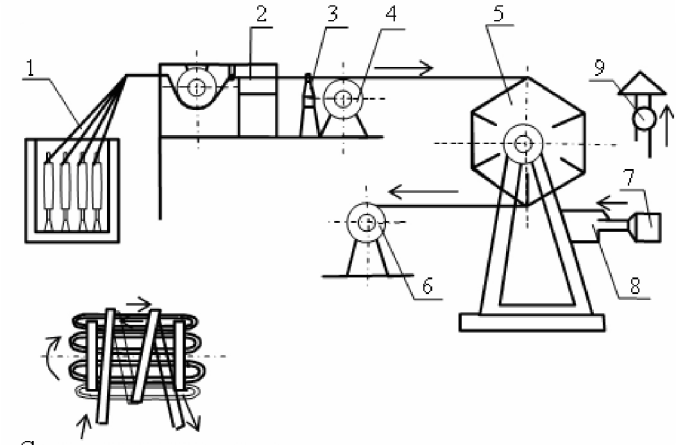


Схема перемещения ленты
по вращающемуся барабану

Рис. 8.2 Малогабаритная установка для получения препрега в виде ленты:

1 – стеклонити с бобин, установленных в шпулярнике; 2 – пропиточная ванна с отжимными валиками; 3 – раскладчик нитей, формирующий из них ленту; 4 – подающий валик; 5 – цилиндрическая камера сушки ленты с барабаном, между двумя боковыми дисками которого расположены шесть конвейеров подачи ленты; 6 – катушка с лентой препрега на намоточном устройстве; 7 – калорифер; 8, 9 – вентиляторы.

Намотка, осуществляемая на автоматизированных намоточных станках с программным управлением, позволяет получить изделия различных форм и размеров. Наиболее широко метод намотки применяется для изготовления конструкций, имеющих форму тел вращения или близкую к ней. Намоткой изготавливают трубы, баки, цилиндрические и конические оболочки, стержни, короба и т. п.

На рис. 8.3 представлена схема станка для спиральной намотки оболочек сложной формы. При этом армирующий материал укладывается на поверхность оправки под некоторыми расчетными углами, которые выбираются в зависимости от схемы нагружения конструкции изделия и, в конечном счете, определяют механические характеристики ПКМ. Требуемый угол укладки достигается в результате подбора скоростей вращения оправки и перемещения раскладчика. Материал при намотке укладывается с некоторым натяжением,которое способствует увеличению давления формования и получению монолитной структуры ПКМ.

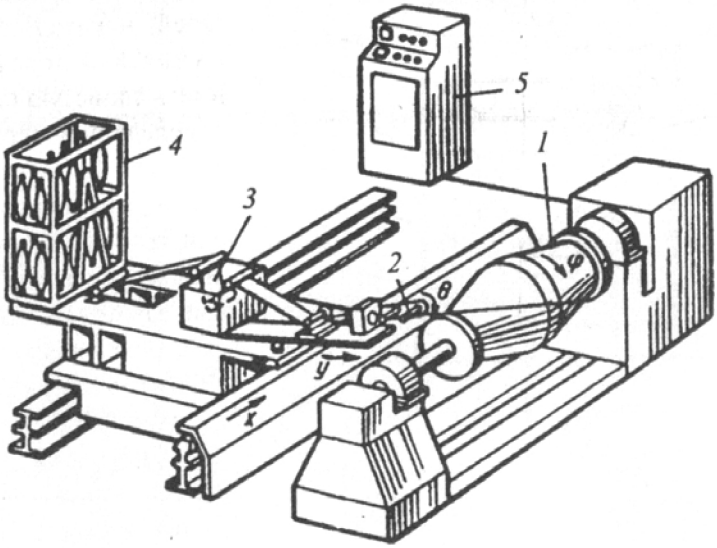


Рис.8.3. Схема станка для спиральной намотки нитью:
1 – технологическая оправка; *2* – интераскладчик ; *3* – пропиточно–натяжное устройство; *4* – шпулярник; *5* – блок программного управления

Метод прессования. Прессование является одним из наиболее распространенных методов формообразования деталей из ПКМ. Прессование деталей осуществляется с помощью пресс-формы, в которой создаются необходимые давление и температура для формования заготовки и отвердения полимерного связующего компонента (рис. 8.4). Пресс-форма нагревается с помощью электронагревателей, размещенных в плитах матрицы и пуансона или другими способами.

Давление для формования изделия создается с помощью гидравлического пресса. На рабочем столе пресса закрепляется матрица, а на подвижной плите – пуансон пресс-формы.

Прессованием изготавливают детали из материалов с хаотическим и ориентированным расположением волокон. Исходными материалами при прессовании в этом случае могут быть короткие волокна, обрезки лент, гранулы из пучков волокон, предварительно пропитанные связующим материалами и соединенные в результате его частичного затвердевания в таблетки.

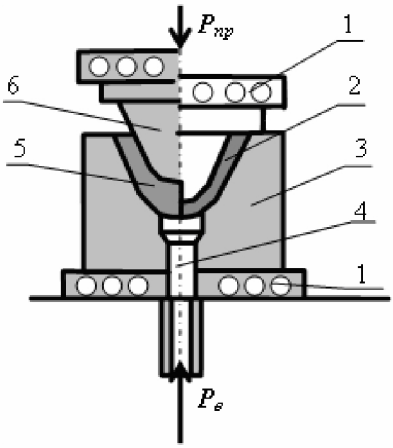


Рис.8.4. Схема прессования:
1- плиты обогрева; 2- прессованная заготовка; 3- матрица; 4- выталкиватель; 5- навеска полуфабриката; 6- пуансон

При изготовлении деталей, в которых композитный материал должен иметь слоистую структуру с определенной ориентацией волокон, используют заготовки из препрегов (лент или тканей). В этом случае предварительно раскроенные заготовки укладываются в определенном порядке в пакет и слегка спрессовываются.

Собранная слоистая заготовка помещается в нагретую пресс-форму. После этого пресс-форма смыкается, и материал выдерживается заданное время при температуре отвердевания связующего материала, а затем готовое изделие удаляется с помощью имеющихся в пресс-форме выталкивателей.

Метод вакуумного и автоклавного формования. *П*роцессы вакуумного и автоклавного формования заключаются в выкладке заготовок на плоскую или криволинейную форму и последующем формообразовании детали давлением сжатых газов (автоклавный метод) или атмосферным давлением, действующим на замкнутый объем, в котором создается разрежение (вакуумный метод). Эти методы предназначены для получения конструкций сложной формы из предварительно пропитанных термореактивными и связующими материалами тканых армирующих элементов путем послойной укладки заготовок из них на технологической оправке с последующим затвердением. При этом выполняется воздействие давления формования, которое прикладывается через эластичную диафрагму, изготовленную из пленки или резины.

На рис. 8.5 и на рис. 8.6 показаны схемы вакуумного и автоклавного прессования. Давление формования достигает 2 МПа в автоклавах, 40 МПа в гидроклавах и до 0,1 МПа в вакуумных чехлах. Затвердение заготовок происходит в печи или непосредственно в автоклаве. Температура и продолжительность процесса затвердения определяются типом

связующего материала и геометрическими параметрами заготовок. Охлаждение заготовок происходит под давлением совместно с технологической оснасткой. После охлаждения заготовка извлекается из формы и при необходимости проходит дальнейшую обработку.

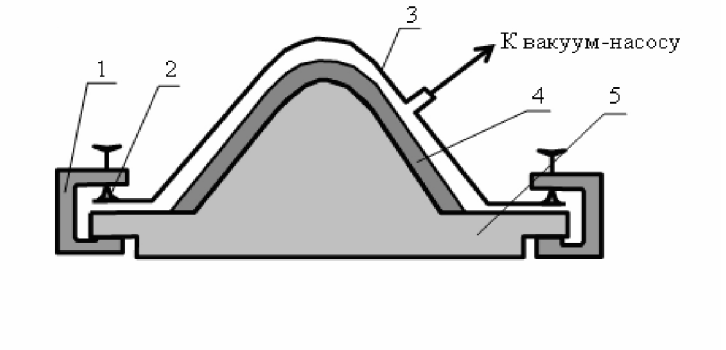


Рис. 8.5 Схема вакуумного формования:
1 – винтовой зажим; 2 – прижимное кольцо; 3 – резиновый чехол;
4 – формуемое изделие; 5 – форма.

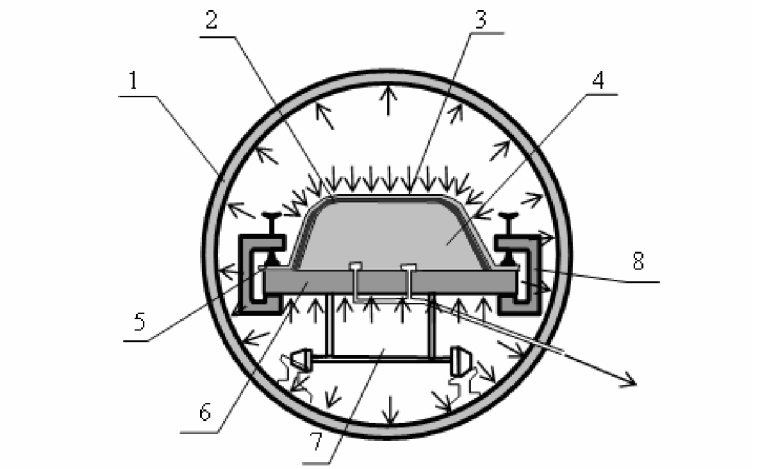


Рис. 8.6 Схема формирования изделий в автоклавах и гидроклавах:
1 – корпус автоклавы; 2 – резиновый чехол; 3 – формовочное изделие; 4 – форма; 5 – прижимное кольцо; 6 – плита; 7– тележка; 8 – винтовой зажим.

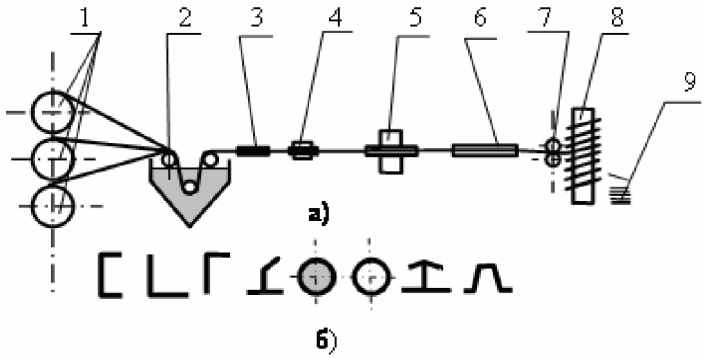


Рис. 8.7 Схема установки для изготовления изделий полтрузией: а – схема процесса полтрузии; б – вид продукции (сечение профилей); 1 – армирующий материал; 2 – ванна со связующими материалами; 3 – направляющие ролики; 4 – матрица; 5 – обогреваемая пресс-форма; 6 – печь для термообработки; 7 – тянущее устройство; 8 – устройство для резки профиля; 9 – накопитель заготовок.

Метод пултрузии. В последние годы широкое применение находят профильные изделия (прутки, трубы и другие конструктивные элементы), изготовляемые из волокнистых композитов на полимерной матрице путем непрерывного протягивания армирующего материала, пропитанного связующими компонентами, затвердеваемыми в профилирующей форме специальной установки. Такой процесс называют пултрузией (по аналогии с экструзией, при которой материал выходит через фильеру под действием давления). При пултрузии материал протягивается под действием внешнего усилия. Схема установки для получения конструктивных элементов пултрузией, показана на рис. 8.7.

Армирующий материал (жгуты, холсты или тканые ленты) последовательно проходит через ванну *2* с жидким связующим раствором, пропитывается, сжимается, поступает в матрицу *4* предварительного формования, а затем в обогреваемую пресс-форму *5*, где фиксируется требуемая конфигурация изделия и происходит затвердевание полимерного связующего компонента. В матрице предварительного формования плоская по форме лента пропитанного материала постепенно преобразуется по сечению к форме получаемого конструктивного элемента.

Окончательно сечение изделия формируется в профилирующей матрице *5*, где в результате нагрева происходит частичное затвердевание. Для завершения отвердевания элемент после формования дополнительно термически обрабатывают в печи *6*.

Материал протягивается по всему тракту формообразования с помощью какого-либо тянущего устройства, например фрикционной роликовой передачи, гусеничного механизма и т.п. Полученный профиль разрезается на части определенной длины, которые используются при сборке конструкций.

Области применения ПКМ

Стеклопластики – одни из первых конструкционных материалов на полимерной основе. Они наиболее полно изучены, их давно применяют в судостроении, авиации, на транспорте, в строительстве и других отраслях промышленности. Стеклопластики из всех ПКМ являются самыми дешевыми. Поэтому их применение оправдано в серийном и массовом производстве. Высокая коррозионная стойкость, способность к восприятию ударных нагрузок, отличное качество поверхности и красивый внешний вид обусловили их широкое применение.

Органопластики обладают малой плотностью, высокими показателями прочности и жесткости; имеют хорошие показатели влагостойкости, химической стойкости, диэлектрические и теплофизические данные. Эти свойства органопластиков определили их применение в качестве материалов для электро– и радиотехнического производства. Эти материалы имеют хорошие теплоизоляционные и теплозащитные, эрозионно– и коррозионностойкие качественные показатели. Они также обладают хорошими фрикционными показателями и используются для изделий различных отраслей промышленности.

Наиболее полно прочность органических волокон реализуется при растяжении. Поэтому выгодным оказалось применение однонаправленного органопластика. Такой органопластик используется для изготовления методом намотки разнообразных сосудов, работающих при высоких внутренних давлениях. Эти емкости используются для жидкого кислорода и водорода.

Органопластики широко используются в качестве теплоизоляции контейнеров для хранения, а также для транспортирования сжиженных природных газов на автомобилях-рефрижераторах и других транспортных средствах.

Высокая стойкость органопластиков к действию агрессивных сред позволяет широко использовать их для изготовления химической аппа-

ратуры. В сочетании с деревом они широко используются в производстве спортинвентаря: хоккейных клюшек, теннисных ракеток, лыж и др. Благодаря высоким диэлектрическим характеристикам, показателям длительной прочности и работоспособности при повышенных температурах органопластики применяют в качестве обмоточных лент роторов электродвигателей. Низкая диэлектрическая проницаемость этих материалов в широком диапазоне частот от 1 до 10 ГГц, т.е. вплоть до частот радиоволн, обусловила использование их для изготовления радиопрозрачных обтекателей антенных устройств, взамен дорогостоящих стеклопластиков, на основе кварцевых волокон. Легкие листовые материалы на основе тканей и волокна из органических волокон используются в производстве динамиков радиоприемников магнитофонов и других деталей радио– и телеаппаратуры, где очень важна высокая огнестойкость.

Углепластики обладают характерными сочетаниями ряда уникальных свойств: высокими значениями жесткости и прочности, относительно невысокой плотностью, химической инертностью, тепло-, электропроводность и др. Важным фактором, определяющим перспективность производства углепластика, является доступность и налаженное производство исходного сырья.

Эти материалы имеют важное значение для обеспечения антикоррозионной защиты оборудования химических производств. Углепластики применяются для усиления металлических комбинированных конструкций цилиндрических баков, емкостей, работающих под давлением; деталей, находящихся в поле действия центробежных сил или подвергающихся вибрациям. Так, усиление оболочки корпуса компрессора газотурбинного давления Д-36, выполненного из алюминиевого сплава, с намоткой углепластика позволило уменьшить уровень вибронапряжения на 15%, увеличить ресурс работы в 2 раза, снизив при этом на 15% массу детали.

Применение высокомодульных углепластнков в обшивках и других деталях конструкционного напряжения самолетов и вертолетов обеспечивает снижение массы до 30% и повышает долговечность изделий. Углепластики нашли применение в качестве обшивки трехслойных панелей с сотовыми гофрированными или трубчатыми заполнителями в различных конструкциях. Трехслойные конструкции элементов поверхностей управления самолетом (рули, закрылки, тормозные щитки, створки люков и т. д.) обеспечивают снижение массы на 12…40%, а

использование углепнастиков для панелей пола и перегородок самолетов уменьшает вибрации и уровень шума на 20...30 %.

Биологическая совместимость углеродного волокна с тканями живого организма позволяет использовать углепластики для протезирования и для производства медицинских приборов. В последнее время они используются для изготовления спортивных товаров. Из углепластиков изготавливают рамы велосипедов, теннисные ракетки, удилища, луки, байдарки, яхты и т. п. Высокая химическая стойкость углепластиков позволяет применять их в химическом машиностроении для изготовления трубопроводов, цистерн, насосов, сосудов, уплотнений и других элементов конструкций, работающих в агрессивных средах, а их электропроводность - при создании различных нагревательных устройств.

Боропластики эффективны в элементах конструкций, определяющими критериями работоспособности которых являются высокие удельные значения жесткости и прочности при действии сжимающих нагрузок.

Боропластнки используются в основном в изделиях авиационной и ракетно-космической техники из-за большой стоимости исходного сырья (борных волокон): благодаря высокой прочности и жесткости при сжатии – при создании балок, панелей, стрингеров несущих частей летательных аппаратов. Например, если металлическая двутавровая балка работает на изгиб, то ту ее полку, на которую действуют сжимающие напряжения, усиливают пластинами из боропластика, а другую полку, работающую на растяжение, упрочняют углепластиком. Масса такой балки на 20...30% меньше, чем масса балки из алюминиевых сплавов при одинаковой несущей способности.

Возможно применение боропластиков в стойках шасси, отсеках фюзеляжа, обшивке крыльев самолетов, в дисках компрессоров газотурбинных двигателей, в корпусных деталях, работающих при всестороннем или одноосном сжатии, в трубах, сосудах внутреннего давления. Замена металлических изделий боропластиковыми позволяет снизить их массу, повысить удельную жесткость, статическую прочность и вибропрочность.

Экономия массы, получаемая при использовании материалов на основе борных волокон и полимерной матрицы, стимулировала разработку разнообразных конструкций и технологических процессов. Одним из достаточно хорошо изученных является метод, по которому предварительно изготовленные пустотелые профили или конструкции сначала

заполняются непрерывными борными волокнами, а затем пропитываются смолой для получения однородной структуры.

8.3. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ АРМИРОВАННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Металлические армированные композиционные материалы (МКМ) - такие материалы, в которых матрицей выступают металлы и их сплавы, а арматурой – металлические и неметаллические волокна. Применение высокопрочных и высокомодульных волокон значительно повышает физико-механические характеристики МКМ, а использование металлической матрицы увеличивает прочность материала в направлении, перпендикулярном волокнам (трансверсальную), и прочность при сдвиге до значений, сопоставимых с аналогичными величинами металлов, так как прочность при сдвиге КМ определяется свойствами матрицы.

Металлическая матрица требует значительно более интенсивных в температурном и силовом отношении технологических методов и, кроме того, производство элементов конструкций из МКМ неразрывно связано с технологией их получения. В настоящее время на базе металлургических производств организован выпуск полуфабрикатов из МКМ в виде листов, труб и профилей.

Технологическую схему производства полуфабрикатов и деталей из МКМ можно представить следующим образом:

1) очистка поверхности волокон и матрицы – мойка, чистка, сушка;

2) объединение волокон и матрицы – сборка чередующихся слоев матричных элементов и волокон либо приготовление волокон в литейной форме под заливку матричным металлом;

3) получение компактных МКМ методами пластической деформации, порошковой металлургии или литья, либо комбинацией этих методов.

Важнейшим в технологии МКМ является этап совмещения армированных волокон с матричным материалом. Способы совмещения можно разделить на твердофазные процессы, жидкофазные и процессы осаждения (напыления).

Для твердофазных методов характерно использование матрицы в твердом состоянии преимущественно в виде порошка, фольги или тонкого листа. Процесс создания МКМ заключается в сборке пакета заготовок, состоящего из чередующихся слоев матричного материала и уп-

рочняющих волокон, и последующего соединения компонентов между собой различными методами: диффузионной сваркой, сваркой взрывом, пластическим деформированием, спеканием и т.п.

Жидкофазный метод предусматривает получение МКМ совмещением армирующих волокон с расплавленной матрицей. К ним относят различные методы пропитки волокон жидкими матричными материалами.

Изготовление МКМ методами осаждения (напыления) состоит в нанесении на волокна различными способами (газофазным, химическим, эдектролитическим, плазменным и т. п.) матричного материала и заполнение им межволоконного пространства.

Комбинированные методы включают последовательное или параллельное применение первых трех методов (например, плазменное напыление и горячее прессование, горячее прессование и последующая прокатка и т. д.).

Выбор метода получения МКМ определяется природой матрицы и волокна, возможностью совмещения компонентов с обеспечением необходимой между ними связи на границе раздела, особенностью процесса, позволяющего одновременно получить материал и деталь, экономичностью, наличием оборудования и т. д.

Метод получения МКМ. Рассмотрим основные методы получения МКМ, применяемые в практике.

Метод твердофазного совмещения матрицы и волокон. Обработка давлением является одним из наиболее часто применяемых методов изготовления МКМ, состоящих из деформируемых матричных металлов и сплавов.

Если в качестве арматуры выбраны волокна со значительным запасом пластичности, то уплотнять МКМ можно прокаткой, импульсным прессованием с помощью взрыва или ударной нагрузки, гидроэкструзией и т. п.

В случае армирования металлов хрупкими или малопластичными волокнами чаще всего применяют процессы, при которых степень пластической деформации невысока, например диффузионную сварку или прокатку с малыми обжатиями.

В зависимости от формы полуфабриката используют различные способы сборки заготовок, подвергаемых пластической деформации.

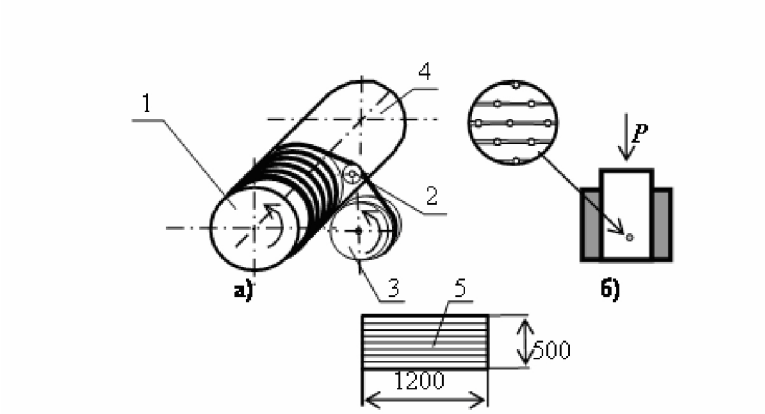


Рис. 8.8 Схема формирования МКМ типа А1-В способом намотки монослоев:
а – получение исходной заготовки; б – прессование заготовки;
1 – барабан; 2 – натяжное устройство; 3 – бобина бороволокна;
4 – алюминиевая фольга; 5 – заготовка.

Листовые заготовки собирают способом монослоев или способом «сэндвич». Заготовки типа «сэндвич» собирают укладкой в пакет слоев волокон (сеток, матов, тканей) и матричных слоев фольги, соблюдая последовательность укладки слоев, требуемую схему армирования и степень армирования. Нужную степень армирования в заготовке обычно обеспечивают применением матричной фольги различной толщины, укладкой различного числа слоев арматуры или использованием волокон различных диаметров. Способом «сэндвич» получают заготовки только с продольно-поперечным расположением волокон.

Способ монослоев, схема которого представлена на рис. 8.8, позволяет собирать заготовки, в которых слои волокон, могут быть ориентированы под различными углами друг к другу в соответствии и с требованиями наилучшего восприятия внешних нагрузок.

При сборке заготовок этим способом осуществляют намотку бороволокна (одного слоя волокон с требуемым шагом и углом намотки) с бобины *3* на цилиндрический барабан-оправку, на котором закреплен слой алюминиевой фольги *4*. Для фиксации геометрии укладки волокна закрепляют на фольге 4 беззольным клеем в местах, по которым в дальнейшем фольга разрезается. Снятые с барабана монослои укладывают в нужном порядке в стопу и уплотняют прессованием.

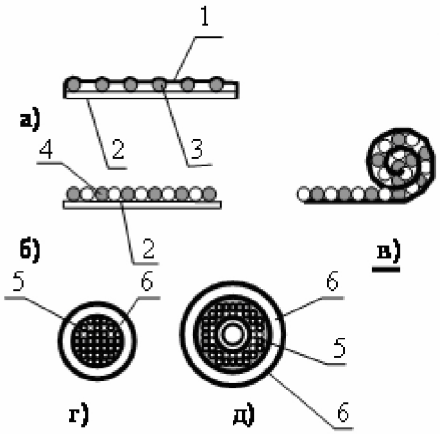


Рис. 8.9 Схема получения армированных прутковых заготовок (а, б) и трубчатых заготовок из биметаллической проволоки (г, д): а – армированный монослой; б – полоса с армирующими и матричными волокнами; в – сворачивание армированной полосы в рулон; 1 – матричная рифленая фольга; 2 – матричная полоса; 3 – армирующее волокно; 4 – волокно из металла матрицы; 5 – биметаллическое волокно; 6 – трубчатая оправка.

Трубчатые и прутковые заготовки получают прокаткой, экструзией и волочением. Схемы получения армированных прутковых и трубчатых заготовок показаны на рис. 8.9. Армированный монослой (рис. 8.9,*а*), состоящий из матричной рифленой фольги 1 н матричной полосы 2, между которыми расположены волокна 3, сворачивают в плотный рулон (рис. 8.9, *в*), подлежащий последующему уплотнению.

Другим методом получения прутковых заготовок, в которых арматура ориентирована вдоль оси прутка (рис. 8.9, *г*), можно назвать укладку в трубу *6* волокон с нанесенным на них матричным покрытием (биметаллическое волокно *5*). Если укладку биметаллических волокон провести между внутренней и наружной трубами *6*, то можно получить трубчатую заготовку МКМ. Уплотняют такие заготовки гидроэкструзией или волочением. Трубчатые заготовки можно также получить совместной намоткой армирующего и матричного волокон.

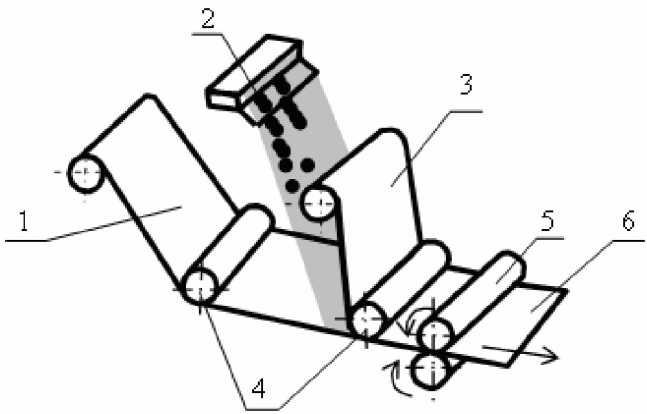


Рис. 8. 10 Схема непрерывного процесса прокатки металлических армированных полос:
1, 3 - разматыватели полос; 2 – бункер для дискретных волокон; 4 – ролики; 5- рабочая клеть прокатного стана; 6 – армированные полосы.

Наиболее производительный способ производства армированных лент и листов – прокатка. По этой технологии между валками *5* прокатного стана уплотняют либо матричные ленты и арматуру в виде непрерывных волокон (сеток, листов), либо ленты *1, 3* с расположенными между ними дискретными элементами (рис. 8.10). Прокаткой можно получить и армированные профили. Для этого используют сортовые прокатные станы, в калибры которых подают матричные ленты вместе с волокнами.

Для уплотнения заготовок типа «сэндвич», а иногда для изготовления готовых деталей из МКМ применяют диффузионную сварку. Отличительным признаком этого процесса является отсутствие больших пластических деформаций, поэтому диффузионная сварка незаменима при получении МКМ, армированных хрупкими волокнами.

Особенно большими возможностями обладает метод диффузионной сварки под давлением в газостате или в автоклаве.

При динамическом горячем прессовании для уплотнения пакета используют энергию удара. Предварительно пакет равномерно прогревают, затем переносят под молот и наносят удар падающими частями с

заданной энергией. При этом компоненты МКМ соединяются в течение долей секунды. При этом методе получения МКМ нельзя использовать хрупкие волокна.

Сварка взрывом – весьма перспективный метод получения МКМ как в виде полуфабрикатов (листов, труб), так готовых изделий. Он не требует нагрева перед деформацией, что позволяет сохранить исходную прочность армирующих волокон.

Метод жидкофазового совмещения. Разновидности метода совмещения матрицы и волокна МКМ различаютхся между собой условиями пропитки армирующего наполнителя:

1) пропитка расплавом при нормальном давлении;
2) вакуумное всасывание;
3) пропитка расплавом под давлением;
4) комбинированные методы пропитки (с использованием давления и вакуума, центробежных сил и т.д.).

Условия пропитки в основном определяются реакционной способностью расплавленной матрицы и смачиваемостью ею волокон. Металлические матрицы, как правило, плохо смачивают керамические армирующие волокна. Увеличить способность металлов смачивать керамику удается введением в расплав легирующих веществ: титана, хрома, циркония. Пропитка волокон расплавом матрицы при нормальном давлении (иногда называется способом непрерывного литья КМ) является наилучшим способом изготовления изделий сложной формы и полуфабрикатов в виде прутков, труб, профилей и т.д. Этот способ применим в тех случаях, когда волокна термодинамически стабильны в расплавленной матрице. Самый простой его вариант заключается в укладке волокон в литейную форму и заливке в нее расплавленного металла матрицы. Перспективной и значительно более широко применяемой разновидностью метода пропитки расплавом при нормальном давлении является непрерывная пропитка пучка волокон.

Для упрочняющих волокон, склонных к окислению при нормальных условиях, необходимо применять защитную атмосферу либо вакуум при переработке их в МКМ. Методом пропитки в вакууме получают МКМ на основе алюминия и магния, упрочненные борными волокнами на основе никелевых сплавов, упрочненных вольфрамовой проволокой и пр.

Пропитку используют для получения углеалюминия (Al–C). Применяют две разновидности пропитки:

1) протяжку углеродного жгута через матричный расплав с последующим формованием пропитанных жгутов;

2) принудительную пропитку каркаса из углеродных волокон, уложенных в пресс-форме.

Характеристики материалов при этом получаются примерно одинаковыми.

Газофазные методы осаждения (напыления). Осаждение (напыление) – это газофазные, химические и элекрохимические процессы получения МКМ. Главной технологической особенностью этих процессов является нанесение на волокна покрытий из матричного материала, который, заполняя межволоконное пространство, образует матрицу МКМ.

Преимущества метода осаждения (напыления) заключается в следующем:

1) отсутствует разупрочнение волокон, поскольку волокно в процессе формообразования изделий из МКМ не подвергается воздействию высоких температур или значительным механическим нагрузкам;

2) исключается возможность непосредственного нежелательного контакта волокон друг с другом;

3) имеется возможность формообразования полуфабрикатов н изделий сложной геометрической формы;

4) процесс введения матрицы может быть осуществлен в непрерывном варианте, в том числе в промышленных масштабах.

Главным недостатком процессов осаждения (напыления) является трудность использования в качестве матриц сложнолегированных сплавов.

В практике производства МКМ наибольшее применение получили методы газотермического (обычно плазменного) напыления электролитического осаждения. Плазменное нанесение покрытий заключается в следующем: наносимый материал матрицы в виде порошка или проволоки подводится к плазменной струе, температура которой около 15000К, расплавляется и подхваченный сильным потоком плазмообразующего газа (например, аргона) направляется к поверхности изделия. Двигаясь с большой скоростью (150 м/с), частицы материала при ударе о поверхность подложки (металлическая фольга) прочно соединяются с уложенными на ней определенным образом волокнами. Полученный таким образом МКМ требует дальнейшей обработки давлением или диффузионной сваркой.

На рис. 8.11 показаны схемы получения МКМ с использованием метода плазменного напыления.

Принципиальная схема изготовления МКМ электролитическим осаждением с использованием непрерывных волокон показана на рис. 8.12. Волокно перематывается с катушки на специальную металлическую оправку, служащую катодом. Оправка частично погружена в электролит и совершает вращательное движение с заданной скоростью. Анод, изготавливаемый из осаждаемого металла – матрицы, размещается на определенном расстоянии.

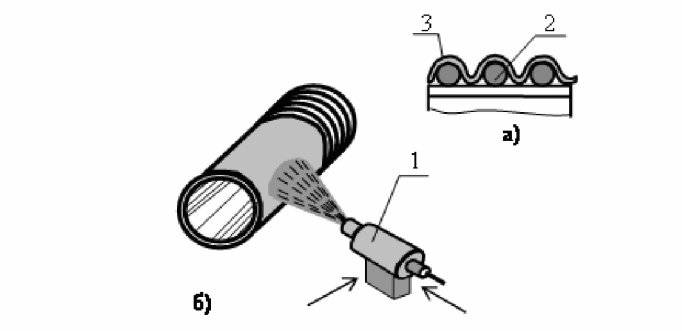


Рис. 8. 11 Схема плазменного напыления многослойных заготовок (а) и цилиндрической детали (б):
1 – плазмотрон; 2 – волокно; 3 – напыляемый материал.

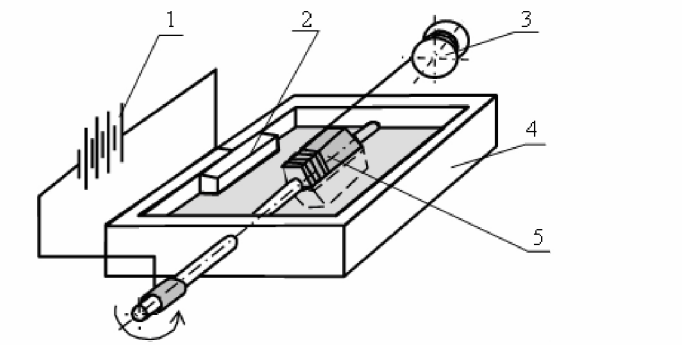


Рис. 8.12. Схема изготовления МКМ способом электролитического осаждения:
1 – источник питания; 2 – анод; 3 – шпуля с волокном; 4 ванна с электролитом; 5 – катод–оправка.

В результате осаждения материала анода на оправку как правило образуется плотный малопористый материал, который фактически не требует дальнейшего уплотнения методом прессования, спекания или прокатки. Правда, при использовании волокон бора или металлических волокон диаметром 100 мкм и более в процессе формирования МКМ образуется пористость.

МКМ можно получить также осаждением из газовой фазы, испарением и конденсациией, катодным распылением и другими способами, которые для формирования МКМ применяются практически очень редко. Эти способы рассмотрены в специальной литературе.

Области применения МКМ. МКМ все чаще применяют в таких областях современной техники, в которых они должны работать при низких, высоких и сверхвысоких температурах, в агрессивных средах, при статических, циклических, ударных, вибрационных и других нагрузках. Наиболее эффективно применение МКМ в таких конструкциях, особые условия работы которых не допускают применения традиционных металлических материалов.

В настоящее время особое внимание уделяется боралюминию как одному из первых материалов, определивших возможность применения МКМ в авиационно-космических конструкциях.

По зарубежным данным, применение боралюминия в планере самолета позволило снизить его массу с 3860 до 2990 кг, т. е. на 23%, и увеличить за счет этого на 115% полезную нагрузку без уменьшения скорости и дальности полета.

Первый отечественный МКМ этого типа (ВКА-1), разработанный в ВИАМе, был получен с помощью диффузионной сварки. Предел прочности и модуль упругости боралюминия ВКА-1 при объемном содержании волокон бора 50% с прочностью волокон 2500 МПа составляют соответственно 1100 МПа и 260 ГПа.

Боралюминнй практически сохраняет свои высокие прочностные и упругие свойства до температур 673...773К. Существенно расширить рабочую температуру боралюминиевых материалов можно, используя волокна из борсика (волокна бора с нанесенным защитным покрытием карбида кремния).

Эффективность применения МКМ в авиационной технике можно оценить на примере их использования в конструкции самолета ИЛ-62, что может обеспечить снижение взлетной массы самолета при сохранении летных характеристик на 17%, увеличение дальности полета на 15% и увеличение полезной нагрузки на 20%.

Применение боралюминиевых композиций эффективно в космических летательных аппаратах, узлах конструкций, подвергающихся нагреву, в герметических кабинах, для элементов жесткости панелей, кожухов, юбок ракетного двигателя, соединительных отсеков ступеней баллистических ракет.

Легкие МКМ с алюминиевой матрицей, армированной углеродными высокомодульными волокнами, хотя н обладают пределом прочности немногим выше, чем у предела прочности лучших промышленных алюминиевых сплавов, однако имеют значительно более высокий модуль упругости (140...160 вместо 70 ГПа) при меньшей плотности (2300 вместо 2750 кг/м^2). Особенно велико различие удельных жесткостей у углеалюминиевой композиции в 2,5 раза выше, чем у стандартных сплавов.

Углеалюминий отличается высокой усталостной прочностью, которая находится на уровне значений для титана и легированных сталей. Он обладает также малым коэффициентом температурного расширения при изменении температуры в интервале 293...673К. Отмеченное дает основание конструкторам использовать материалы в опытных конструкциях таких высоконагруженных деталей, как корпус и сопловые лопатки турбин двигателей летательных аппаратов

Углеродные волокна используют также в композиции с медными, свинцовыми, цинковыми матрицами в изделиях различного назначения, для которых требуется высокая износостойкость, малый коэффициент трения, высокая электропроводность, хорошая термостабильность и способность сохранять высокие прочностные и упругие свойства при нагреве. Армирование свинца углеродными волокнами дает возможность получить МКМ с пределом прочности и модулем упругости более чем в 10 раз выше, чем у неармированного свинца. Это позволяет использовать углесвинец как конструкционный материал для оборудования и аппаратуры, обладающей высокой стойкостью в агрессивных средах, способностью подавлять звуковые колебания, поглощать гамма-излучение и выполнять другие функции.

Для изготовления подшипников, работающих без смазочного материала, успешно опробован антифрикционный МКМ на основе свинца, армированного проволокой из нержавеющей стали или оловянистой бронзы.

Введение арматуры из вольфрама или молибдена в медную и серебряную матрицу позволяет получить износостойкие электрические контакты для сверхмощных высоковольтных выключателей.

МКМ на основе никеля и хрома, армированные нитевидными кристаллами оксида алюминия Al_2O_3, а также композиции, в которых матрица изготавливается из жаропрочных сплавов, а арматура - из высокопрочных тугоплавких волокон, перспективны для изготовления жаропрочных деталей газотурбинных двигателей.

Специалистами научно-исследовательского центра ХАБА (США) показана эффективность применения МКМ, полученного методом электролитического осаждения для изготовления камеры высокого давления жидкостного ракетного двигателя. Высокопрочную стальную проволоку наматывали на цилиндрическую оправку с шагом, равным диаметру проволоки, после чего осаждали плотный беспористый слой никеля. Испытания показали, что усиление стальной проволокой повышает прочность цилиндра не менее чем на 50 %.

Области применения МКМ практически неограниченны. К настоящему времени работы в области создания конструкций из них вышли далеко за рамки чисто научных исследований и в ближайшие годы следует ждать им широкого внедрения.

8.4. КЕРАМИЧЕСКИЕ И УГЛЕРОДНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Керамические КМ (ККМ) представляют собой материалы, в которых матрица состоит из керамики, а арматура из металлических или неметаллических наполнителей.

Керамические материалы характеризуются высокими температурой плавления, прочностью при сжатии, сохраняющейся при достаточно высоких температурах, и высокой стойкостью к окислению. Эти свойства керамики, и прежде всего силикатной, в течение многих веков использовались при изготовлении футеровки печей и многих огнеупорных изделий. В настоящее время требования к керамике как конструкционному материалу значительно выросли.

Новые виды керамики на основе высокоогнеупорных оксидов тория, алюминия, бериллия, циркония, магния, ванадия находят широкое применение в технике при экстремальных условиях эксплуатации. Достаточно сказать, что температуры плавления оксидов циркония, алюминия, бериллия, тория и магния составляют соответственно 2973, 2273, 2873, 3473, 3073 и 3111 К.

Наряду с тугоплавкостью от керамики требуются высокие прочность при растяжении и ударная вязкость, стойкость к вибрациям и термо-

удару. Такими свойствами обладают некоторые металлы. Сопоставление свойств керамики и металлов привело к попыткам создания КМ, в которых керамическая матрица сочетается с металлическими включениями в виде порошка. Так появились ***керметы***. Сегодня керметом считают материал, содержащий более 50% тугоплавкой неметаллической фазы. Созданы керметы на основе карбида титана и оксида алюминия, слюды и никеля, системы оксид алюминия – вольфрам – хром и многие другие. Однако керметы обладают одним существенным недостатком – хрупкостью, поэтому их применение во многих случаях ограничено.

Исследованиями было установлено, что улучшения физико-механических характеристик керамики можно получить, армируя ее металлическими, углеродными и керамическими волокнами. Чтобы достичь одинаковой с керметом термостойкости, в керамику нужно ввести примерно в 3 раза меньше металлических волокон, чем металла в виде порошка. Для получения армированных ККМ пользуются преимущественно методами порошковой металлургии, а также гидростатическим, изостатическим и горячим прессованием, шликерным, центробежным и вакуумным литьем. В настоящее время в стадии освоения находится взрывное и гидродинамическое прессование.

В ККМ нагрузка переносится с малопрочной матрицы на более прочную арматуру. Однако эффект увеличения предела прочности при растяжении наблюдается у ККМ не всегда. В некоторых случаях композиция получается менее прочной, чем неармированная матрица. Объяснить это можно сочетанием в ККМ малой пластичности с высоким модулем упругости при растяжении. Из-за этого удлинения матрицы при нагружении ее до разрушения оказывается недостаточным для того, чтобы передать значительную часть нагрузки армирующим элементам. Достигнуть этого можно либо за счет подбора материала арматуры с более высоким чем у матрицы модулем упругости, либо за счет предварительного напряжения арматуры при условии достаточно прочной связи ее с матрицей.

Важна ориентация армирующих волокон в керамике. Они могут располагаться в матрице как направленно, так и хаотично. Схема ориентации волокон в матрице определяется условиями нагружения детали при эксплуатации.

ККМ с металлическими волокнами. Керамику чаще армируют волокнами вольфрама, молибдена, стали, ниобия. Основная цель введения в керамику металлических волокон заключается в образовании

пластической сетки, которая способна обеспечить целостность керамики после ее растрескивания и уменьшить вероятность преждевременного разрушения. Изготовляют такие ККМ в основном методами горячего прессования, поскольку металлические волокна не взаимодействуют с оксидной керамикой вплоть до температур 2073...2773К. Удельная вязкость и термостойкость ККЖ1 непрерывно повышаются по мере увеличения объема армирующих волокон в композите. Однако при содержании волокон более 25% растет пористость материала, что приводит к его разупрочнению.

Широкое применение металлических волокон для армирования керамики ограничивается их низкой стойкостью к окислению при высоких температурах.

ККМ с углеродными волокнами. Взаимодействие углерода с оксидами, карбидами и силицидами происходит при более высоких температурах, чем с металлами, поэтому использование керамики в качестве матриц высокотемпературных КМ с углеродными волокнами перспективно.

В тех случаях, когда предполагаемая температура эксплуатации деталей их ККМ превышает 2273К, целесообразно использовать керамическую матрицу на основе карбидов, при температуре выше 1273К – на основе боридов и нитридов, при более низких температурах – оксидную матрицу.

Важным условием эффективного использования прочности углеродистых волокон в ККМ является оптимальное соотношение модулей упругости волокон и матрицы. При объемной доле углеродных волокон 50...60% прочность волокна максимально используется при отношении модулей упругости материала и волокна, приближающемся к 0,1, поэтому для армирования керамики следует применять высокомодульные волокна.

Из углекерамических КМ наиболее широко исследованы композиты со стеклянной матрицей (боросиликатные, алюмосиликатные, литиевосиликатные и др.). Для указанных материалов характерна стабильность исходных физико-механических свойств вплоть до высоких температур. Например, для ККМ боросилнкатностекло – углеволокно (объемная доля волокна 60%) предел прочности при изгибе 025МПа составляет при 293 К 1и не изменяется до температуры 870К.

Следует отметить, что большое влияние на физико-механические свойства ККМ оказывает выбранный способ формования ККМ.

ККМ с волокнами карбида кремния при практически равной прочности имеют преимущества перед аналогичными материалами с углеродными волокнами, так как имеют повышенную стойкость к окислению при высоких температурах и значительно меньшую анизотропию коэффициента термического расширения.

В качестве матричного материала используют порошки боросиликатного, алюмоборосиликатного, литиевоборосиликатного стекла или смеси стекол в различных соотношениях. Волокна карбида кремния применяют в виде моноволокна или непрерывной пряжи со средним диаметром отдельных волокон 10...12 мкм.

ККМ, армированные моноволокном, получают горячим прессованием в среде аргона слоев из лент волокна и стеклянного порошка. Более удобны с точки зрения изготовления деталей сложных форм материалы, армированные непрерывной пряжей. По своим свойствам эти материалы даже превосходят ККМ, армированные моноволокном.

Материалы типа керамика–керамика имеют большую перспективу применения. Малое различие модуля упругости матрицы и наполнителя, коэффициентов термического расширения, химическое сродство позволяют рассчитывать на получение материалов с уникальными свойствами. Эти материалы смогут работать до температур 2273К. Их можно использовать для конструкций ядерных силовых установок, высокотемпературных подшипников уплотнений, для направляющих н рабочих лопаток газотурбинных двигателей, для антенных обтекателей возвращаемых космических летательных аппаратов и носовых обтекателей ракет.

Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) представляют собой углеродсодержащую или графитовую матрицу, армированную углеродным или графитовым волокном. Эти матрицы обладают свойствами как монолитного графита, так и волокнистых КМ.

Основные преимущества УУКМ состоят в высокой теплостойкости, малой плотности, стойкости к тепловому удару и облучению. Эти материалы обладают высокими прочностными и жесткостными характеристиками при обычной и повышенной температурах, низким коэффициентом термического расширения и рядом других ценных свойств. УУКМ длительно работоспособны при температурах до 773К в окислительной среде и до 3273 К в инертной среде и вакууме.

В качестве армирующего материала наибольшее применение нашли углеграфитовые волокна, нити, жгуты и пряжа. Типовым материалом

для матриц служат смолы (фенольные, фурановые, эпоксидные и др.) и каменноугольный пек – продукт крекинга угля.

В настоящее время для получения УУКМ в основном используются три способа:

1) пропитка смолой волокнистого каркаса – карбонизация;

2) осаждение углерода из газовой фазы между волокнами каркаса;

3) сочетание пропитки смолой и карбонизации с осаждением углерода из газовой фазы.

Основными этапами при первом способе технологического процесса получения УУКМ являются формование исходной заготовки методами намотки или выкладки из углепластика, полимеризация связующего, карбонизация, уплотнение пиролитическнм углеродом, окончательная термическая обработка и нанесение противоокислительных покрытий на основе карбидов кремния, иридия, циркония. Полимеризация связующего материала осуществляется при температуре не более 473К. При последующем пиролизе связующего материала происходит образование науглероженной фазы (кокса).

Чем больше выход твердых продуктов пиролиза, тем выше прочность кокса и его сцепления с волокнами, а также качество получаемого УУКМ. Если конечная температура пиролиза не превышает 1073...1773К, то получается карбонизированный материал. В случае нагрева карбонизированного материала до 2773...3273К происходит его графитизация. Процесс пиролиза органических матриц достаточно продолжителен и составляет примерно 75 ч. Для получения плотного материала с хорошими механическими свойствами многократно осуществляют цикл пропитка–затвердевание–карбонизация. Плотность УУКМ, в зависимости от режимов его получения, находится в интервале от 1300…2000 кг/м^3. Свойства УУКМ изменяются в широком диапазоне. Они определяются многими факторами:

свойствами исходного волокна и природой связующего компонента;

степенью наполнения;

свойствами кокса и прочностью его связи с волокном;

условиями пропитки;

затвердевания, карбонизации, графитизации;

числом циклов пропитки и т.д.

Второй способ изготовления УУКМ состоит в получении заготовки из сухого волокна методом укладки, намотки, плетения, армированием ткани в третьем направлении короткими волокнами, прошивкой. В настоящее время интенсивно разрабатываются УУКМ, армированные в трех и более направлениях. Углеродные волокна собираются с помощью специальных приспособлений в соответствии со схемой ориентации волокон в блоки. Получаемые таким образом пространственно-армированные УУКМ характеризуются относительной изотропностью и низким коэффициентом термического расширения. Такие материалы позволяют изготавливать заготовки для получения из них деталей больших размеров.

При получении матрицы методом химического осаждения из газовой фазы применяют природный газ метан или аналогичный газообразный углеводород в комбинации с водородом или аргоном. Этот второй способ перспективен, поскольку позволяет создавать материалы любой архитектуры с любыми заданными свойствами. Таким образом можно осаждать не только углерод, но и такие материалы, как цирконий, медь, тантал и др. Этот способ позволяет осуществлять послойное осаждение, придавая КМ различные желаемые свойства. Таким образом, полученный УУКМ в виде блока с определенной плотностью, жесткостью является полуфабрикатом, который может быть переработан в деталь методами механической обработки. В общем случае УУКМ, полученные вторым способом, имеют бóльшую плотность, более высокое содержание углерода, лучшие характеристики сцепления волокна с матрицей. Эти материалы имеют бóльшую стоимость, чем УУКМ, полученные пропиткой.

УУКМ используют в различных отраслях техники в случаях, когда традиционные материалы неработоспособны – в условиях тепловых нагрузок, в узлах трения, окислительных средах и т.п. Особенно перспективно применение УУКМ в авиационной и ракетно-космической технике для изготовления лопаток турбин, сопловых блоков, панелей, носовых обтекателей, вкладышей критического сечения двигателей, деталях тормозных самолетных устройств и т.п.

8.5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

8.5.1. Требования к конструкции лопаток из полимерных композитных материалов

Лопатки из ПКМ могут представлять цельную конструкцию, изготавливаемую за один прием, или комбинированную конструкцию – перо из ПКМ, полки лопатки металлические. Так как композиционные материалы имеют недостаточную прочность на межслойный сдвиг и низкую контактную прочность, передачу нагрузок от лопаток на корпусные детали осуществляют по поверхности, имеющей бóльшую площадь, чем у металлической конструкции. При действии высоких контактных нагрузок на перо лопатки крепятся металлические фольговые накладки (обечайки). В конструкции лопатки предусмотрена защита кромок и поверхности от ударного и эрозионного воздействия. Одна из типичных конструкций лопатки из ПКМ показана на рис. 8.13.

Для лопаток, подверженных воздействию ударных нагрузок, рекомендуется применение комбинированных композитов типа стеклоуглепластика, металлоуглепластика и органоуглепластика.

Схема армирования должна быть согласована с направлением действия основных нагрузок для обеспечения минимальных напряжений в материале лопатки, а также обеспечивать симметричную уравновешенную структуру материала для исключения коробления конструкции.

Слои материала типа тканей, фольги, сеток в зоне кромок укладываются таким образом, чтобы они не выходили наружу, а огибали кромку. Толщина слоя материала, количество слоев в пакете и состояние препрега должны обеспечивать удельное давление прессования 0,3…1,0 МПа при массовой доле связующего компонента в отпрессованной лопатке 35…40 %.

Лопатка выполняется сборкой отдельных слоев материала со спинки к корыту от больших слоев к меньшим и снова к бóльшим слоям (рис. 8.14).

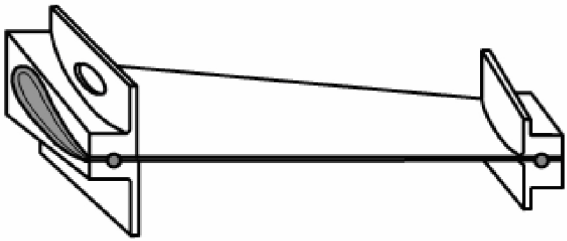


Рис. 8.13. Конструкция соединения пера лопатки из ПКМ с полками за счет поднутрений.

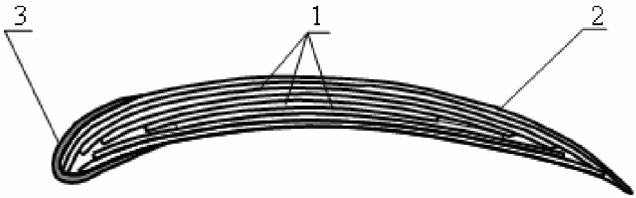


Рис. 8.14. Лопатка, выполненная из отдельных слоев:
1– внутренние слои; 2– наружный слой;3– металлическая оковка.

Входная кромка лопатки защищается металлической оковкой. Для увеличения прочности на межслойный сдвиг выходную кромку можно прошить органонитями, стеклонитями, металлическими скобками. Выходная кромка защищена накладкой из металлической сетки. Верхние слои со стороны спинки и корыта могут быть выполнены вместе. При этом ткань огибает выходную кромку.

Лопатка с замкнутой структурой выполняется навивкой материала, представляющего собой послойную развертку лопатки, от наружных контуров к центру. Навивка осуществляется от первого внутреннего слоя к наружному.

Для обеспечения замкнутости слоев материала развертка выполняется из слоистых материалов типа тканей, фольги и т. п.

При раскрое материала развертка слоев вырезается под определенным (установочным) углом, обеспечивающим уравновешенную и симметричную структуру. Полностью уравновешенная и симметричная

структура материала лопатки обеспечивается за счет расположения слоев углеродной ленты (слои управления) под углами, уравновешивающими слои развертки.

В случае больших габаритов лопаток развертка слоев выполняется из нескольких частей или комбинируется из развертки и отдельных слоев КМ. Замыкание контура может производиться по вариантам, представленным на рис. 8.15.

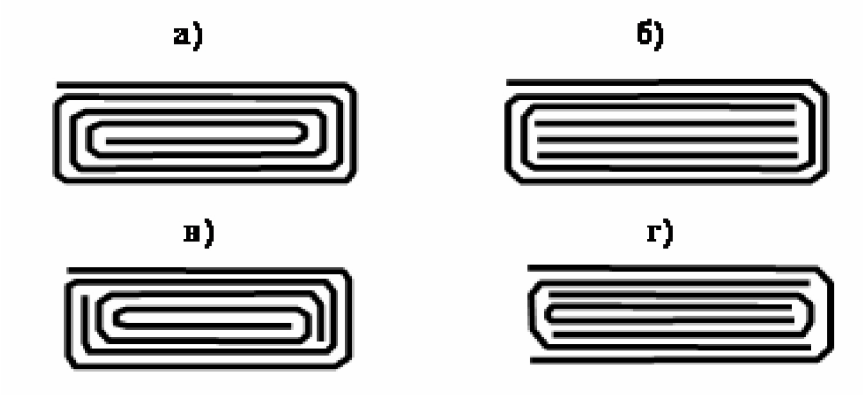


Рис. 8.15. Схема вариантов замыкания контура:
а– по всему сечению; б– в верхних слоях; в– комбинированное;
г– полуконтуров по всему сечению

На каждый слой развертки может укладываться по несколько слоев углеродной ленты, кроме слоев управления, для обеспечения необходимого уровня прочности и жесткости материала. Массовая доля углеродного волокна в стеклоуглепластике может достигать 54%.

В полости между сгибами слоев требуется устанавливать вкладыши из высокомодульного наполнителя для повышения упругопрочностных характеристик и стабильности свойств материала.

Замкнутая структура материала лопатки из ПКМ обеспечивает повышение прочности конструкции на межслойный сдвиг и изгиб, жесткости и усталостной прочности, стойкости кромок к удару.

Для изготовления лопаток направляющего аппарата могут применяться ткани из стеклоуглепластика, стеклоорганопластика, углеродная лента, органоткань, органостеклоткань и различные связующие материалы.

При выборе ПКМ для лопаток необходимо ориентироваться на их свойства при повышенных температурах в соответствии с температурными условиями работы двигателя.

8.5.2 Особенности конструкций технологической оснастки

Технологическая оснастка для формования деталей из композиционных материалов должна обеспечивать замкнутости слоев в зоне кромок, т.е. формование должно быть безоблойным (для навитых структур).

На рис. 8.16 представлены принципиальные конструкции пресс-форм для безоблойного формования лопаток. Элементы пресс-форм, оформляющие кромки лопатки, выполняются съемными, что обеспечивает свободное извлечение отпрессованных лопаток.

Клиновая пресс-форма представлена на рис. 8.16,*а*. Клинья *2* и обойма *1* сопряжены под углом 6…7°. Клинья при распрессовке выходят вместе с оформляющими знаками *3* и *4* и лопаткой, затем от лопатки удаляются клинья и отсоединяются оформляющие знаки. Наличие клиньев позволяет свести к минимуму зазор между элементами пресс-формы, оформляющими поверхность лопатки, и исключает облой на кромках.

Пресс-форма с упругими элементами представлена на рис. 8.16, *б*. На клиньях выполнены уплотнительные элементы *5*, изготавленные из твердой резины, выступающей над плоскостью клина на высоту, превышающую зазор в собранной пресс-форме между оформляющими знаками и клином.

Пресс-форма с технологическими накладками в зоне кромок представлена на рис. 8.16, *в*. В пресс-форме щеки с помощью винтов *3* поджимаются к матрице *4*. Для полного исключения облоя служат технологические накладки *9* из металлической фольги.

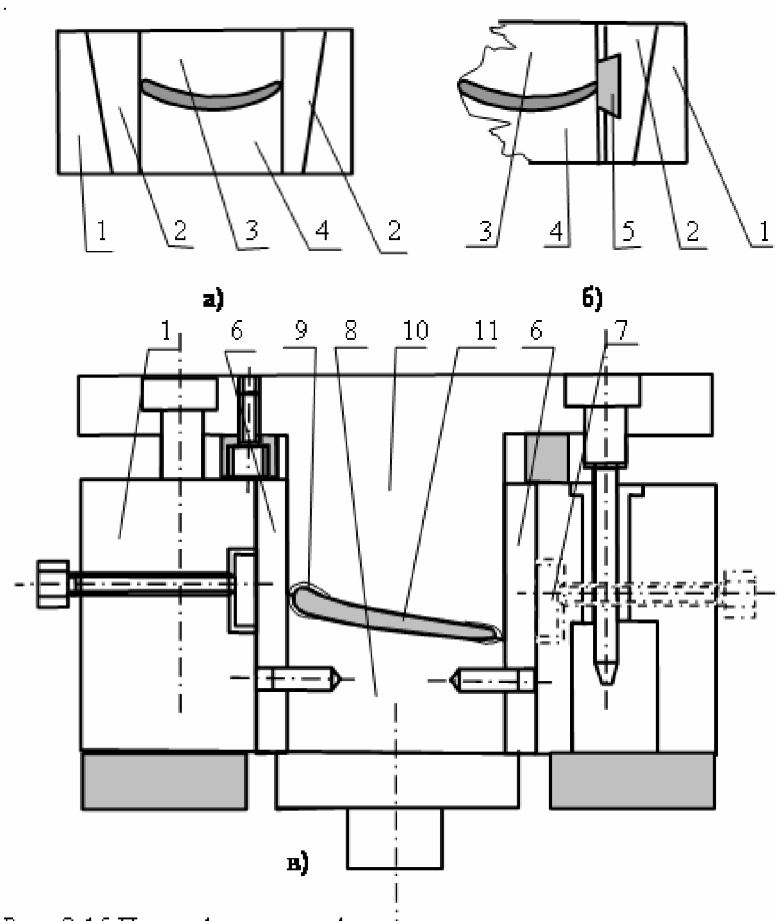


Рис. 8.16 Пресс-форма для формирования лопаток:
а – клиновая; б – с упругим элементом;
1 – обойма; 2 – клинья; 3.4 – оформляющие знаки; 5 – уплотнительные элементы;
в – с технологическими накладками;
6 - щеки; 7 – винты; 8 – матрица; 9 – технологическая накладка
10 – пуансон; 11 – лопатка.

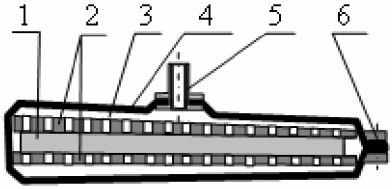


Рис.8.17. Устройство для предварительного формирования заготовки лопатки:
1- лопатка; 2- цулаг; 3- дренажный слой;
4- эластичный мешок; 5- штуцер; 6- зажим

Предварительное формообразование (таблетирование) проводится в специальном устройстве, представленном на рис. 8.17.

Устройство состоит из обкладочных перфорированных листов (цулаг *2*), имеющих профиль спинки корыта лопатки *1*, дренажных слоев 3 из металлической сетки, стеклосетки, обеспечивающих свободный выход летучих компонент со всей поверхности таблетки, вакуумного мешка *4*, штуцера *5*, зажима *6*.

Для предотвращения смещения осей слоев заготовки лопатки при таблетировании в устройстве предусмотрены специальные штыри.

Использование данного устройства исключает смещение слоев и потерю ориентации волокон при формовании лопаток. Это устройство позволяет свести к минимуму пористость материала.

8.5.3. Технологический процесс изготовления лопатки из ПКМ

Процесс изготовления лопаток включает следующие основные операции (рис. 8.18).

1. подготовку армирующего наполнителя;
2. приготовление связующего;
3. пропитку и сушку наполнителя;
4. раскрой материала;
5. навивку заготовки лопатки;
6. таблетирование заготовки;
7. укладку в прессформу;

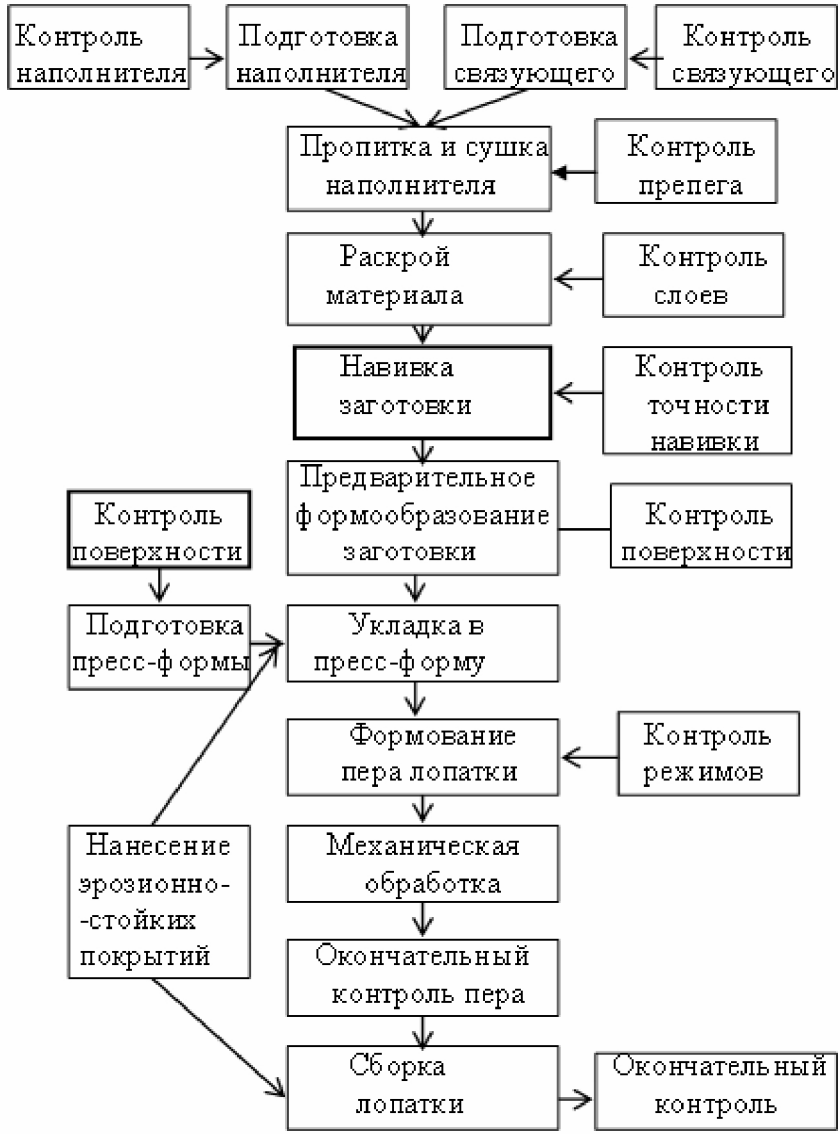


Рис.8.18. Схема технологического процесса изготовления лопаток из ПМК методом прямого прессования

8. формование пера лопатки;
9. механическую обработку;
10. контроль качества пера;
11. сборку лопатки;
12. нанесение эрозионностойкого покрытия.

Подготовка армирующего наполнителя. Перед пропиткой связующим материалом стеклоткань и углеродная лента просушиваются при 120° С в течение 3 часов в термошкафу.

Раскрой производится одновременно из пакета заготовок материала на лазерной установке по программе с использованием вибрационного ножа. Шаблоны изготавливаются по чертежу развертки слоев и отдельных слоев материала лопатки с припуском по длине лопатки на 10-15 мм. Заготовки слоев, раскраиваемые на лазерной установке, имеют такой же припуск.

При раскрое необходимо точно выдерживать углы армирования волокна в слоях материала и установочный угол.

На слоях, образующих пакет материала лопатки, в зоне технологических припусков и на периферии внутренних слоев по шаблону карандашом отмечаются осевые линии.

Изготовление пакета лопатки. Перед сборкой заготовки подготовленные слои материала контролируют на отсутствие включений, прилипших обрезков волокон, извилистости волокна в слоях. Сборка пакета проводится от первого слоя со стороны спинки или корыта до последнего, надеванием слоев на фиксирующие иглы.

В случае изготовления навитой лопатки на развертке слоев из препрега стеклоткани по шаблону карандашом на кромках отмечаются линии сгиба и осевые линии.

На соответствующие слои стеклоткани отдельные слои углеродной ленты накладываются так, чтобы совпали осевые линии. Слой углеродной ленты прикатывают электровеликом, нагретым до 60° С, для соединения со стеклотканью. Одновременно прикатываются вкладыши из углеродной ленты для заполнения полостей между сгибами слоев и для образования хвостовика.

Навивка пакета производится от внутреннего слоя к наружному, строго по линиям сгиба.

В случае, когда развертка состоит из нескольких частей, после навивки первого участка развертки свернутый пакет укладывается на последний слой второго участка и т.д. При этом соблюдается совмещение

осевых и торцевых линий слоев пакета. Пакет лопатки фиксируется иглами.

Таблетирование. Заготовка лопатки с фиксаторами устанавливается в приспособление для таблетирования. Фиксаторы закрепляются в перфорированных пулагах приспособления.

Пакет вместе с приспособлением помещается в вакуумный мешок, конец мешка затягивается металлическими зажимами, помещается в термостат или термопечь и производится вакуумирование в течение 45 мин при вакууме 0,07…0,08 МПа.

После охлаждения до комнатной температуры таблетку извлекают из приспособления и удаляют фиксаторы.

Поверхности таблетки контролируются на отсутствие продольных и поперечных гофров, проводится контроль массы, толщины, ширины в нескольких сечениях. Толщина заготовки должна превышать толщину лопатки на 5…10%. Все данные заносятся в паспорт на заготовку.

Прошиваются задние кромки лопаток стеклянной или органической нитью. Готовая таблетка передается на формование или хранение.

Подготовка пресс-формы. Очищенные рабочие поверхности обезжириваются бензином и ацетоном и просушиваются в течение 10…15 мин на воздухе.

На подготовленную поверхность наносится антиадгезионная смазка. Затем производится термообработка при (220 + 5) С в течение 2,0…2,5 ч. Обработка пресс-формы повторяется через три-четыре прессования.

Изготовление оковки. Оковки изготавливаются из листа коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т, толщиной 0,15…0,30 мм на лазерной установке или в штампе в соответствии с черт.10. Полоски с одной стороны обрабатываются антиадгезионной смазкой, с другой стороны зачищаются шкуркой. Оковка тщательно обезжиривается бензином, затем ацетоном и сгибается по центру в сторону зачищенной поверхности. На внутренней стороне оковки не допускается наличие следов антиадгезионной смазки.

Подготовка заготовки к прессованию. На таблетку со стороны спинки и корыта укладывается эрозионностойкая пленка. На переднюю кромку устанавливается оковка. (На заднюю кромку может устанавливаться оковка из металлической сетки). На оковку входной кромки помещают технологическую накладку из алюминиевой фольги толщиной 50…80 мкм, а на выходную кромку – технологическую накладку из алюминиевой фольги 80…100 мкм.

Прессование лопатки. Элементы пресс-формы, оформляющие кромки лопатки, поджимаются к матрице и заготовка укладывается в пресс-форму. При этом поверхность заготовки контролируется на отсутствие инородных включений. Длина заготовки должна быть меньше длины оформляющих знаков для того, чтобы по торцам оставались свободные зоны для самонатяжения волокна и исключения его искривления при прессовании.

Устанавливается пуансон и включается обогрев пресс-формы. В связи с низкой текучестью связующего материала запрессовка лопатки осуществляется медленно.

С целью снижения внутренних термических напряжений требуется равномерный обогрев пресс-формы и медленное охлаждение лопатки в закрытой пресс-форме до 40° С. Давление поддерживается в течение всего времени формования и извлечения лопатки из пресс-формы.

Термообработка предотвращает вспучивание и расслоение материала при действии повышенных температур и обязательна для лопаток.

Для предотвращения коробления лопаток термообработка проводится в пресс-форме или в фиксирующих приспособлениях.

Сборка лопатки заключается в соединении пера лопатки с металлической арматурой (полками). Зоны пера, идущие под заделку, зачищаются шкуркой и обезжириваются. Поверхности просечек в металлической арматуре также обезжириваются.

На подготовленные поверхности наносится слой клея.

Выбор клея осуществляется в соответствии с условиями эксплуатации лопаток. Сборка лопатки производится в приспособлениях, обеспечивающих точность установки и фиксацию элементов лопатки на время затвердевания клея или заливочной массы. Крепление металлическими штифтами производится в приспособлении до затвердевания клея. После сборки и затвердевания клея выступающие за пределы полок торцы пера обрезаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скубачевский, Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели: Учебник для студентов авиационных вузов / Г.С. Скубачевский. – М.: Машиностроение, 1969. – 544 с.

2. Теория воздушно-реактивных двигателей: Учебник для студентов авиационных вузов / В.М. Акимов [и др.] /Под ред. С.М. Шляхтенко. – М.: Машиностроение, 1975. – 568 с.

3. Мамаев, Б.И. Методы газодинамического проектирования и совершенствования элементов проточной части турбины авиационных высокотемпературных двигателей. Диссертация. СГАУ: 1995. – 298 с.

4. Специальные стали: Учебник для студентов вузов / С.В. Гольдштейн [и др.] – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.

5. Размерный анализ изделий с учетом контактной податливости сопрягаемых деталей / И.А.Коганов [и др]. – Тульский политехнический институт, 1986. – 27 с.

6. Шамарина, Г.Г. Разработка и внедрение термостойких покрытий термобарьерных покрытий для повышения надежности и долговечности ГТД. Диссертация. – СГАУ: 1997. – 275 с.

7. Корсаков, В.С. Основы технологии машиностроения: Учебник для студентов вузов. – М.: Высшая школа, 1974. – 336 с.

8. Маталин, А.А. Технология машиностроения: Учебник для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 1985. – 512 с.

9. Гжиров Р.И., Серебреницкий, П.П. Программирование обработки на станках с ЧПУ – М.: Машиностроение 1990. – 592 с.

10. Основы теории точности машин и приборов / В.П. Булатов [и др.] – М.: Наука, 1993. – 234 с.

11. Шевелев, А.С. Исследование точности размерных связей в авиадвигателестроении. Диссертация. КАИ: 1968. – 304 с.

12. Рекомендации. Качество продукции. Статистические методы управления качеством. Регулирование технологических процессов методом группировки. – М.: ВНИИНМАШ, 1978. – 30 с.

13. Рекомендации. Качество продукции. Статистические методы управления качеством. Анализ точности уровня настройки и стабильности процессов методом группирования. – М.: ВНИИНМАШ, 1978. – 78 с.

14. Шевелев, А.С., Федорченко, Г.П. Суммирование производственных погрешностей по предельным значениям их параметров. ИВУЗ. Авиационная техника. – Казань, 1963. – 12 с.

15. Greenwood, W.H., Chase K.W. A new tolerance analysis method for designers and manufacturers // Eng. Industry. Trans. ASME. 1987. Vol. 109. N2. – P. 112-116.

16. Greenwood, W.H., Chase K.W. Tolerance analysis with nonlinear problem. ASME. 1989. N4. – P. 94 – 99.

17. Кутай, А.К., Кордонский, Х.В. Анализ точности и контроль качества в машиностроении. – М.: Машгиз, 1958. – 286 с.

18. Ван дер. Варден. Математическая статистика. – М.: Иностранная литература, 1960. – 435 с.

19. Дрейпер, Н., Смит, Г. Прикладной регрессионный анализ. Финансы и статистика. Кн. 1, 1986. – 366 с.

20. Балакшин, Б.С. Размерные цепи и компенсаторы. – М.: Госмашметиздат, 1934. – 44 с.

21. Дунаев, П.Ф. Размерные цепи. – М.: Машгиз. 1963. – 303 с.

22. Семенченко, Н.В., Мирер, Я.Г. Повышение надежности лопаток газотурбинных двигателей технологическими методами. – М.: Машиностроение, 1977. – 160 с.

23. Полуавтомат специальный плоскошлифовальный глубинного шлифования с ЧПУ модели ЛШ-233: Руководство по эксплуатации. – Липецк: ЛСЗ. 1985. – 103 с.

24. Исследование длительной прочности теплозащитных покрытий на лопатах ГТД / В.А. Барвинок [и др.] //Проблемы машиностроения и автоматизации. 1997. №1. – 48-53 с.

25. Упрочнение теплозащитных покрытий. / Г.Г. Шамарина [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации.1995. №12. – 55-58 с.

26. Мовчан, Б.А. Характеристики покрытий, осаждение в вакууме. – Киев: Конференция Электронно-лучевые и газотермические покрытия. – 1983.

27. Шамарина, Г.Г., Киселев, А.С. Способ получения защитного покрытия. А. С. №94011658 РФ МКН6 С23С 14/06. 30.03.94.

28. Шамарина, Г.Г., Барвинок, В.А. Способ обработки деталей. А.С. №94023406 РФ МКН6 С23С 8/58, С23С, 10/60. 20.06.94.

29. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

30. Мухин, В.С. Формирование специальных свойств поверхности деталей летательных аппаратов. – Уфа: УАИ, 1986. – 83 с.

31. Анферов, М.А. Система многокритериальной структурно-функциональной оптимизации перспективных технологических про-

цессов в авиадвигателестроении. Диссертация. – Уфа: УАИ, 1997. – 381 с.

32. Брюханов, А.Н. Ковка и объемная штамповка. – М.: Машиностроение, 1975. – 408 с.

33. Семенов Е.И. Ковка и объемная штамповка – М.: Машиностроение, 1972. – 352 с.

34. Шманев, В.А., Шулепов, А.П., Мещеряков, А.В. Струйная гидроабразивная обработка деталей ГТД. – М.: Машиностроение, 1995. – 144 с.

35. Мартынов, А.И. Основы метода обработки деталей свободным абразивом уплотненным инерционными силами. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1981. – 212 с.

36. Цепи размерные. Расчет технологических размерных цепей: Метод. – М.: ГОССТАНДАРТ, 1979. – 192 с.

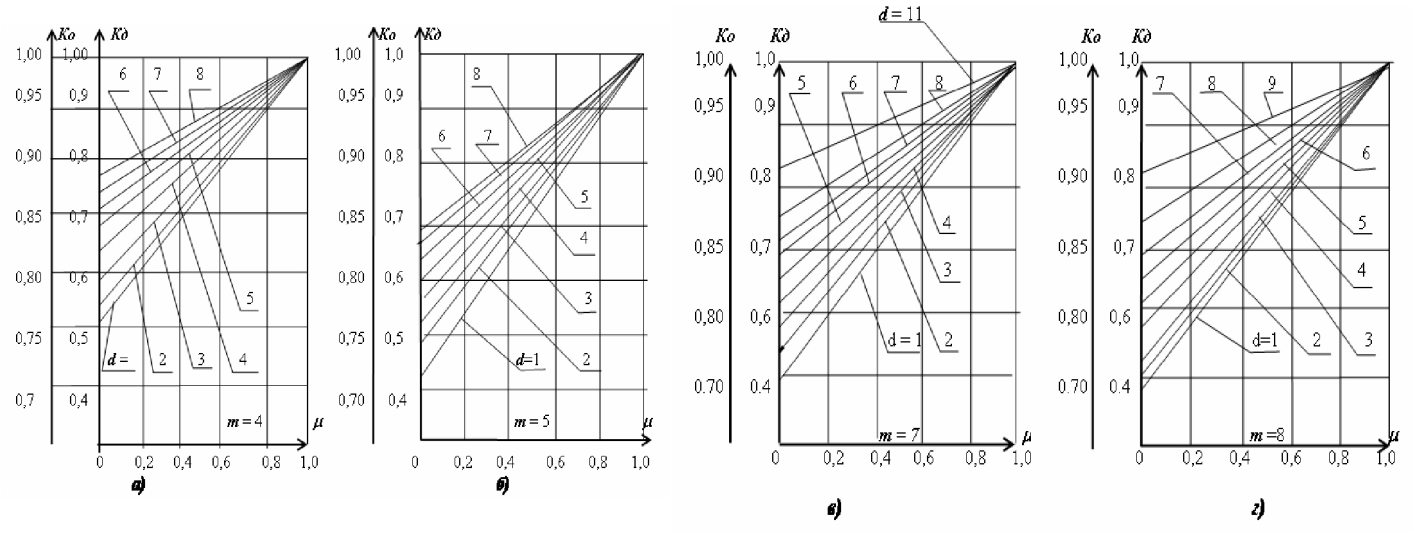
37. Контроль деталей в металлобработке. – М.: Машиностроение, 1981. – 201 с.

38. Трощенко, В.Т., Сосновский, Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов. – Киев: Наукова думка, 1987. – 1262 с.

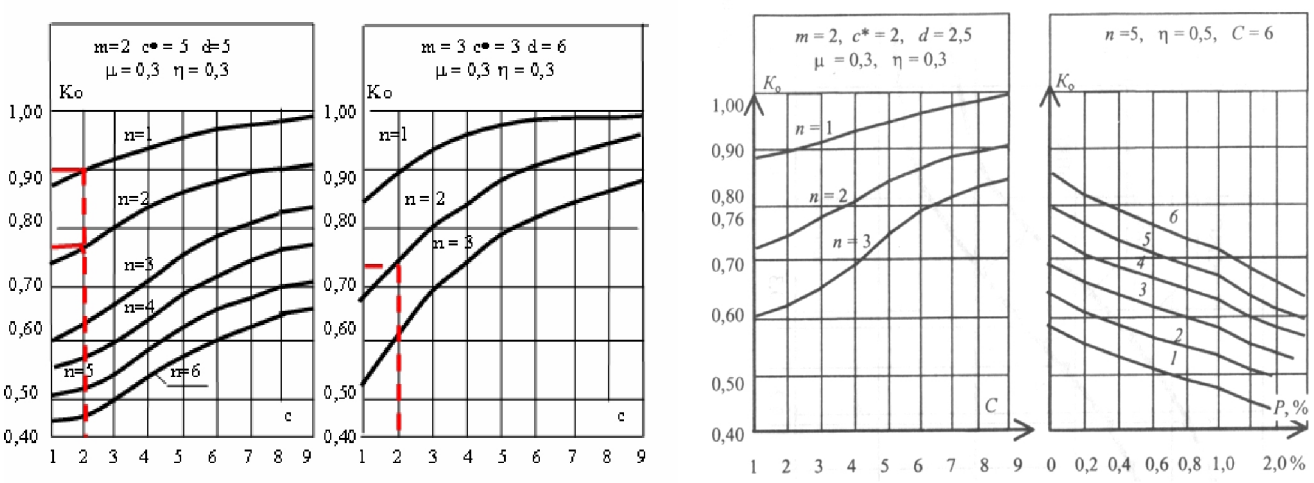
39. Афонькин, М.В., Магницкая, М.В. Производство заготовок в машиностроении. – Ленинград: Машиностроение, 1987. – 256с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Коэффициенты теоретико-вероятностного суммирования для скалярных размерных связей

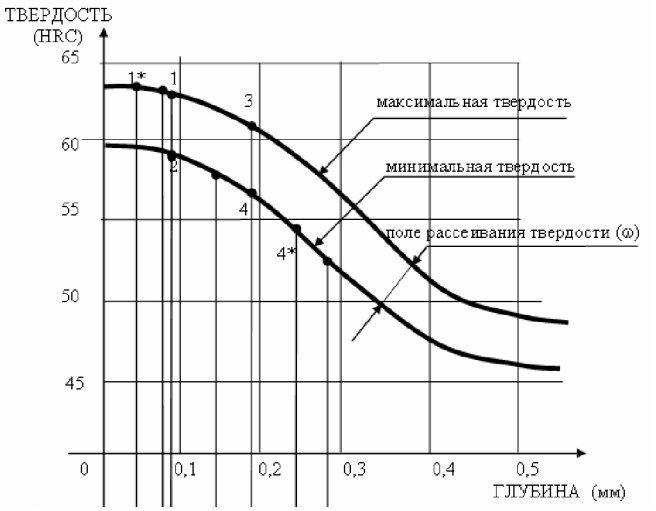


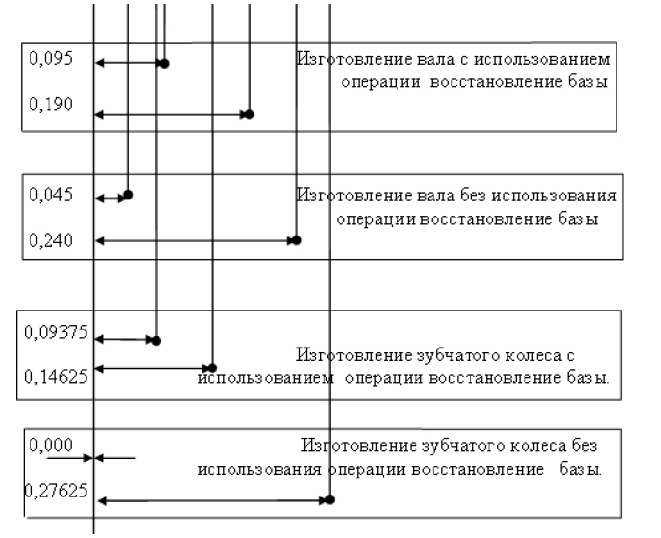
2. Коэффициенты теоретико-вероятностного суммирования для комбинированных связей



д) **е)** **ж)** **з)**

3. График изменения твердости в поверхностном слое заготовки





Учебное издание

Демин Феликс Ильич,
Проничев Николай Дмитриевич,
Шитарев Игорь Леонидович

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Электронное учебное пособие

Под. общ. ред. проф. Ф.И. Демина

Редактор И.И. Спиридонова
Довёрстка И.И. Спиридонова

Электронный ресурс

Арт. Э1/2012.

Самарский государственный аэрокосмический университет.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.