МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Н. Д. Проничев, А. П. Шулепов

Технологические методы обеспечения надежности двигателей летательных аппаратов

Электронное учебное пособие

САМАРА

2011

УДК 621.4.(075.8)
ББК 39.55

Авторы: **ПРОНИЧЕВ Николай Дмитриевич**
ШУЛЕПОВ Александр Павлович
Рецензенты: Д. Л. Скуратов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механической обработки материалов Самарского государственного аэрокосмического университета.
В. Н. Дмитриев, кандидат технических наук, начальник технологического бюро новых методов обработки ОАО «Металлист-Самара»
Редакторская обработка Н. Д. Проничев
Компьютерная верстка А. А. Мещерякова

Проничев, Н. Д. Технологические методы обеспечения надежности двигателей летательных аппаратов [Электронный ресурс] **:** электрон. учеб. пособие /Н. Д. Проничев, А. П. Шулепов; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (7,59 Мбайт). – Самара, 2011. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В учебном пособии рассмотрены основные положения теории надежности, вопросы оценки надежности технологической системы с позиций обеспечения точности геометрических параметров. Приводятся оценки физико-механических свойств поверхностного слоя и долговечности деталей в зависимости от технологии изготовления, определение запаса прочности конструкций как вероятностной величины, условия задач, примеры их решений и необходимые справочные материалы по всем излагаемым темам.

Пособие предназначено для подготовки специалистов, обучающихся по специальности 160301 «Авиационные двигатели и энергетические установки» (ГОС-2), изучающих дисциплину «Обеспечение надёжности технологическими методами» в 9 семестре, для специалистов направления подготовки 160700.65 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» (ФГОС-3), изучающих дисциплину «Испытания и обеспечение надежности авиационных двигателей» в А семестре, для магистрантов по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов» (ФГОС -3), изучающих дисциплину «Обеспечение надёжности технологическими методами» в 9 семестре, для бакалавров по направлению 151900.62 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств (ФГОС-3), изучающих дисциплину «Технологические методы обеспечения надёжности изделий» в 8 семестре.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2011

ВВЕДЕНИЕ

Качество любого изделия определяется его техническим совершенством и надежностью. Надежность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, которые определяют его способность выполнять требуемые функции, если соблюдаются расчетные режимы работы и необходимые условия обслуживания.

Вместе с эти надежность – это и самостоятельное научное направление, служащее основой создания практических методов обеспечения и оценки надежности изделий при их создании и использовании. Теория надежности исследует влияние конструкторских, технологических и эксплуатационных факторов на уровень надежности изделий, который всегда оценивается во времени и в связи с конкретными условиями эксплуатации. Поэтому безопасность и долговечность являются важнейшими характеристиками надежности.

Такой совершенный в техническом отношении объект как двигатель летательного аппарата (ДЛА) предназначен для работы на режимах вблизи предельных границ устойчивости и прочности при оптимальном сочетании параметров массы, нагрузки и прочности. Сложность выполнения этих условий усугубляется необходимостью обеспечить высокую эффективность и надежность конструкции в широком диапазоне изменении условий эксплуатации. Это достигается тщательной и всесторонней оценкой надежности при разработке и доводке ДЛА в ходе соответствующих испытаний как отдельных его составных частей, так и изделия в целом. Надежность двигателя продолжает изучаться и в процессе его серийного производства, причем идет непрерывный поиск технологических средств и методов, направленных на постоянное повышение надежности. К таким методам относится, например, упрочняющая обработка, которая существенно увеличивает усталостную прочность деталей. Постоянное внимание оценке надежности уделяется и в период эксплуатации двигателя, которая дает в руки исследователей большой статистический материал.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ 3

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ 9

1.1 Качество изделий в технологической системе 14

1.1.1 Концепция системы обеспечения качества 14

1.1.2 Особенности концепций 15

ВЫВОДЫ: 18

1.1.3 Почему испытания не выявляют всех скрытых дефектов? 19

1.1.4 Эффективность контроля требований конструкторской документации 21

1.1.5 Некоторые заблуждения при обеспечении качества продукции в технологической системе 28

1.1.6 Работа по обеспечению надежности на этапе создания нового двигателя 37

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ 40

2.1 Порядок решения задач надежности 47

2.2 Основные положения теории вероятностей 50

2.2.1 Случайные события 50

2.2.2 Случайные величины 51

2.3 Основные теоремы теории вероятностей 52

2.3.1 Теорема сложения вероятностей 52

2.3.2 Теорема умножения вероятностей 53

2.3.3 Теорема полной вероятности 54

2.3.4 Теория гипотез (формула Байеса) 57

2.4 Характеристики случайных величин 57

2.4.1 Закон распределения вероятностей случайной величины 57

2.4.2 Функция распределения 58
2.4.3 Основные свойства функции распределения 60
2.4.4 Плотность распределения 60
2.4.5 Генеральные числовые характеристики или параметры законов распределения 62
2.4.6 Математическое ожидание 63
2.4.7 Дисперсия случайной величины 64
2.4.8 Мода и медиана случайной величины 65
3. ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ 67
3.1 Биномиальное распределение 67
3.2 Распределение Пуассона 68
3.3 Экспоненциальное распределение 69
3.4 Распределение Вейбулла 71
3.5 Нормальное (гауссово) распределение 72
3.6 Распределение хи-квадрат 76
4. МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ 78
4.1 Формулы в теории надежности 78
4.2 Инженерно – физические показатели надежности 79
4.3 Инженерно – физические показатели качества и надежности компрессора ГТД 80
4.4 Обеспечение надежности при проектировании 81
4.5 Выделения требований КД по обеспечению надежности 81
4.6 Запасы прочности и вероятность разрушения детали 86
4.7 Роль испытаний в обеспечении надежности 88
4.8 Организация работ по устранению дефектов и отказов при доводке изделия и его опытной эксплуатации 89

5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДЛА В УСЛОВИЯХ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА 90
5.1 Прогрессивные технологические процессы 94
5.2 Обеспечение надежности технологической системы изготовления ГТД 95
5.3 Статистический анализ точности обработки и статистическое регулирование технологических процессов 101
5.4 Корректировка ТС на основе причинно-следственного анализа брака, дефектов и отказов 101
5.5 Понятие технологичности продукции 102
5.6 Сопутствующие явления технологического процесса 104
5.6.1 Наклеп 105
5.6.2 Остаточные напряжения 107
5.6.3 Изменение размеров 109
5.6.4 Структурные и фазовые изменения 110
5.6.5 Повреждения 111
5.6.6 Насыщение, обеднение материала химическими элементами 111
5.7 Обеспечение надежности на этапе получения заготовок 112
5.8 Механосборочный этап 113
5.9 Примеры технологической наследственности 114
5.10 Управление технологической наследственностью 116
5.11 Рекомендации по управлению технологической наследственностью 117
5.12 Методика и виды контроля в серийном производстве 117
5.13 Специальные виды контроля 118
5.14 Влияние точности контроля на качество продукции 119
6. НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ 123
6.1 Условия работоспособности ТС 125

6.2 Надежность ТС по параметрам производительности (R – критериям) 126

6.3 Методы оценки надежности Тс по параметрам качества (по Q-критерию) 127

6.4 Методы оценки надежности ТС по параметру точности 130

6.5 Оценка выполнения заданий в плане надежности ТС по нарушению технической дисциплины 132

6.6 Оценка по параметрам качества продукции 132

6.7 Оценка по комплексным показателям 133

7. КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ 134

7.1 Теоретическая и техническая прочность материалов 134

7.2 Причины, обусловливающие связь технологии изготовления с прочностью деталей 135

7.3 Параметры качества поверхностного слоя 153

7.4 Остаточные напряжения 157

7.4.1 Механизм образования внутреннего напряжения 157

7.5 Влияние параметров качества поверхностного слоя на эксплуатационные свойства детали 158

7.6 Влияние режимов и условий обработки на параметры качества поверхности 167

7.7 Деформационное упрочнение (наклеп и остаточные напряжения) при резании 169

8. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ 182

8.4.1 Диффузионное насыщение металлами 193

8.4.2 Поверхностное плавление с введением необходимых компонентов 194

8.5.1 Упрочнение пластическим деформированием 194

8.5.2 Финишные методы обработки 203

8.5.2.1 Обработка алмазными инструментами 203
8.5.2.2 Турбоабразивная обработка 203
8.5.2.3 Полирование сизалевыми кругами 204
8.5.2.4 Термообработка 205
8.5.2.5 Отжиг 205
8.5.2.6 Термопластичное упрочнение 205
8.5.2.7 Поверхностное легирование 206
8.5.2.8 Цементация 208
8.5.2.9 Азотирование 209
8.5.2.10 Цианирование 209
8.5.2.11 Алитирование 210
8.5.2.12 Лазерная технология обработки поверхностей 211
9. ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ГТД 213
9.1 Назначение, особенности, виды и материалы покрытий. Предъявляемые к ним требования 213
9.2 Уплотнительные покрытия 214
9.3 Жаростойкие покрытия 216
9.4 Термобарьерные покрытия 221
9.5 Современные способы и технологии нанесения покрытий 225
9.6 Термохимическое осаждение покрытий 232
9.7 Газотермическое напыление 233
10. ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ МОДИФИЦИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ 249
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 261
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 263

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Под изделием в авиационной технике понимают:

1. воздушное судно (планер);
2. авиационный двигатель;
3. винт.

Надежность двигателя – основной показатель качества изделия, в силу специфики этого технического устройства.

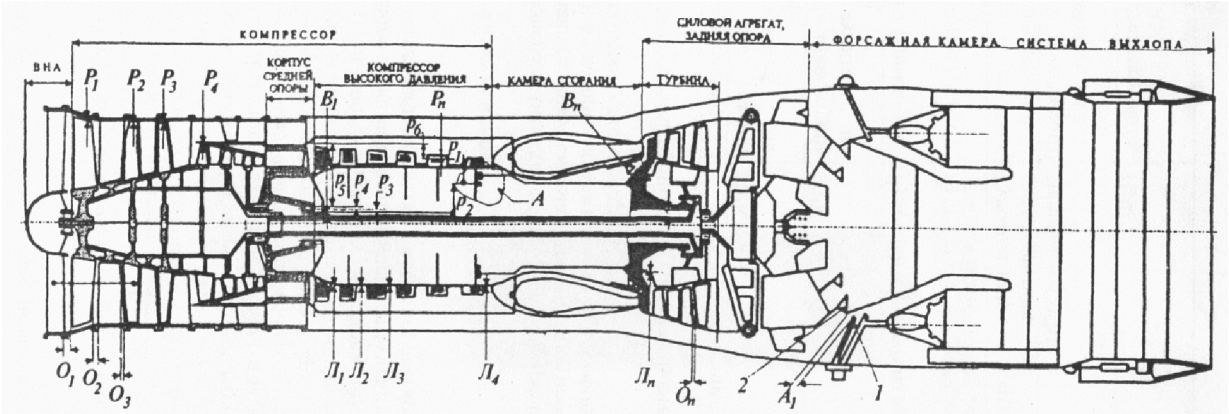


Рисунок 1.1 – Схема турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой

Таблица 1.1 – Материалы и условия работы узлов ГТД

Узел и требования к нему	Материалы, используемые для изготовления
Вентилятор (винт)	
Вентилятор: Диапазон рабочих температур ~ -40…40С, высокая прочность, малый вес, безопасность при разрушении вентилятора, сопротивление воздействию ударов (столкновения с птицами и проч.)	Полимерные композитные материалы или титановые сплавы. Предпочтительна слоистая структура материала
Детали узла вентилятора: Диапазон рабочих температур 200…300С, высокие аэродинамические качества (всасывающее действие), компактность	Сплавы на никелевой основе, титановые сплавы, полимерные композиционные материалы
Компрессор	
Лопатки: Диапазон рабочих температур 400...650С, усталостная прочность, сопротивление эрозии	Титановые сплавы, стали, сплавы на никелевой основе
Диски: Диапазон рабочих температур 400…650С, высокая прочность; сопротивление центробежным нагрузкам; сопротивление усталости	Титановые сплавы, стали, сплавы на никелевой основе
Камера сгорания	
Рабочая температура около 1550С, сопротивление термическим ударам, сопротивление окислению и газовой коррозии	В настоящее время сплавы на никелевой основе с жаростойкими покрытиями, иногда с термобарьерными покрытиями и облицовкой керамикой. В перспективе керакомпозиты
Турбина	
Диапазон рабочих температур 550…1095С, прочность при центробежных и осевых нагрузках, жаропрочность, сопротивление ползучести, жаростойкость, сопротивление термическим ударам	Диски – сплавы на никелевой основе. Лопатки – сплавы на никелевой основе с монокристаллической структурой и жаростойкими и термобарьерными покрытиями
Валы	
Диапазон рабочих температур 50…850С, высокая прочность и жаропрочность	Высокопрочные стали и сплавы на никелевой и железоникелевой основах
Сопло	
Диапазон рабочих температур 650…1300С, жаростойкость, сопротивление эрозионному воздействию газового потока	Сплавы на никелевой основе с жаростойкими и термобарьерными покрытиями, титановые сплавы, керакомпозиты

Качество - это совокупность свойств продукции, обусловливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначеним.

Качество газотурбинных двигателей (ГТД) закладывается в процессе обоснования схемных, конструктивных и технологических решений, при проектировании, отработке макетного и доводке опытных образцов, при отладке технологии; обеспечивается в производстве в ходе технологических процессов обработки, сборки, технического контроля и испытаний; реализуется и поддерживается в эксплуатации.

Качество ГТД оценивается по следующему ряду показателей.

Показатели назначения. Эта группа показателей характеризует свойства продукции, определяющие основные функции, для выполнения которых она предназначена. У газотурбинных двигателей - это тяга и удельный расход топлива, удельная масса, габаритные размеры и др. Эти показатели взаимосвязаны со схемой и программой управления ГТД, внутридвигательными параметрами, такими как максимальная температура газа перед турбиной, общая степень повышения давления компрессора, степень двухконтуности.

Показатели надежности. Надежность - это свойство объекта сохранять во времени свою работоспособность, т.е. обеспечивать в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения.

Основные показатели надежности ГТД - долговечность, безотказность, ремонтопригодность и сохраняемость.

Долговечность - свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Долговечность ГТД характеризуется ресурсом: назначенным и межремонтным.

Безотказность - свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторой наработки. К показателям безотказности ГТД относятся наработка на отказ парка однотипных двигателей, находящихся в эксплуатации, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов.

Используются три вида наработки на отказ: наработка на досрочное снятие двигателя (Тдсд), наработка на выключение в полете (Твп), суммарная наработка на неисправность (Тс).

Ремонтопригодность является свойством двигателя, определяющим трудовые и материальные затраты на его ремонт и техническое обслуживание (ТО).

Ремонтопригодность характеризуется двумя показателями: ремонтной технологичностью (РТ) и технологичностью при техническом обслуживании.

Сохраняемость - свойство объекта сохранять значения показателей долговечности, безотказности и ремонтопригодности в течение и после хранения или транспортировки. Ее показателем является средний срок сохраняемости.

Показатели технологичности. Характеризуют свойства двигателя, определяющие его приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, эксплуатации и восстановлении. К показателям технологичности ГТД относятся его удельная трудоемкость изготовления, удельная материалоемкость и удельная энергоемкость, коэффициент использования материалов и др.

Показатели стандартизации и унификации. Характеризуют насыщенность двигателя стандартными, унифицированными и оригинальными деталями и сборочными единицами, а также уровень унификации с другими двигателями.

Показатели безопасности. Характеризуют свойства двигателя, обусловливающие его безопасную эксплуатацию. Показатели

безопасности должны также отражать требования, обеспечивающие меры и средства защиты человека в условиях аварийной ситуации.

Экологические показатели. Характеризуют уровень вредных воздействий на окружающую среду, возникающих при эксплуатации двигателя: вероятность выброса вредных частиц, газов, излучений при хранении, транспортировке и эксплуатации двигателя, уровень шума и др.

При оценке качества ГТД учитываются также показатели транспортабельности и патентно-правовые.

Показатели качества газотурбинных двигателей формируются на основе оптимизации его параметров применительно к предполагаемым условиям применения и отражаются в документации на образец двигателя, в технических условиях на изготовление, приемку и поставку их в процессе производства.

Как показывает опыт, качество изделия примерно на 40% закладывается на этапе проектирования и конструирования, на 50% обеспечиваются на этапе изготовления двигателей, на 10% поддерживаются при эксплуатации.

Надежностью называется свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения, установленные эксплуатационными показателями в заданных пределах, соответствующие оговоренным режимам и условиям применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Применительно к АД надежность есть комплексный показатель, обусловленный такими свойствами, как безотказность, сохраняемость, ремонтопригодность, долговечность.

Прежде, чем дать определения этих свойств, необходимо разобраться с некоторыми понятиями, которые используются для оценки надежности:

а. отказ – это такая неисправность, без устранения которой дальнейшее выполнение изделием его функций (всех, или даже одной) невозможно, т.е. это событие, заключающееся в нарушении работоспособности;

б. предельное состояние – это такое состояние изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена по причинам: неустранимого нарушения безопасности; выхода параметра за установленные пределы; снижения эффективности эксплуатации; необходимости ремонта;

в. дефект – каждое отдельное несоответствие требованиям нормативной документации.

1.1 Качество изделий в технологической системе

1.1.1 Концепция системы обеспечения качества

В формировании качества и обеспечения высокой надежности промышленного изделия участвуют много людей. История развития отношений между потребителем и изготовителем привела к реализации качества изделия через качество проекта и качество изготовления. Качество проекта рассматривается как мера соответствия проекта требованиям потребителя, а качество изготовления - мера соответствия готового изделия проекту.

Соответственно, на предприятиях разработаны системы обеспечения качества изделия на основе концепции:

"Качество (и надежность) закладывается при проектировании, обеспечивается в производстве и поддерживается в эксплуатации".

Эта концепция получила распространение в США, Европе, в т.ч. и в СССР.

За последнее время, а в Японии уже ~ 30 лет, получила распространение другая концепция, а именно:

“ Качество изделия закладывается от идеи до готового изделия".

Системы обеспечения качества изделий, основанные на этой концепции, дали большой эффект.

Стратегия обеспечения качества наряду о другими концептуальными положениями позволила Японии каждые 10-12 лет за последние 40 лет удваивать свой валовый национальный продукт (~7,95 % ежегодный

средний прирост). Такой прирост отражает скорее революционный путь развития страны по сравнению с эволюционным путем».

1.1.2 Особенности концепций

- концепция, как основа для построения систем обеспечения качества, определилась в связи с признанием примата потребителя над производителем. Например, лозунг фирмы IBM - "Потребители это важнейшие фигуры в нашем деле. Не они зависят от нас, мы зависим от них. Мы не делаем им одолжения, предлагая услуги или товары, это они делают нам одолжение, покупая их... Потребители - это источник существования нашего бизнеса, без них нам пришлось бы закрыть свои предприятия"
Сравните: "их" любезное отношение к покупателю и "наши" очереди;

- в первой концепции ближе всех к потребителю стоит конструктор, во второй - дыхание потребителя чувствуется за плечами каждого 5 работника фирмы;

- первая концепция отражает разделение ответственности перед потребителем, во второй - отвечает фирма и каждый ее сотрудник;

- в первой концепции качество изделия определяет конструктор, во второй – весь коллектив фирмы. Вторая концепция предполагает коллективное формирование качества, требует доброжелательного отношения между всеми специалистами во имя потребителя.

В пользу второй концепции показывают практические случаи, когда по одним и тем же чертежам на разных предприятиях изготавливалась разная по качеству продукция;

- в первой концепции сказано: "... обеспечивается в производстве...". Производственник сразу выкладывает логическую схему: качеству и надежность - выполнение требований конструкторской документации".

Выше мы объясняли, что такое надежность и какие у нее показатели. Где же эти показатели для изготовителя? Их нет. Нет и связки между надежностью технологической системы и надежностью объекта.

Вторая концепция требует постоянного совершенствования качества, в том числе и при выполнении требований конструкторской документации. За рубежом установилось понятие “приемлемый уровень качества”. Этим устанавливается (нормируется) допустимое количество дефектов при изготовлении продукции. Уровень дефектности 500...50 дефектных единиц продукции на 10^6 единиц изготавливаемой продукции в США, а в Японии то же на 10^{19} единиц продукции.

Качество, с точки зрения японских фирм - это бездефектность операций. 85 % автомобилей фирмы " Toyota" не имеют дефектов.

Специалист в области качества г. Деминг заметил: "... кажется, никто, кроме японцев, не понимает, что, улучшая качество, вы повышаете производительность труда";

- в первой концепции отсутствует период устранения отказов и совершенствования изделий. Во второй концепции эта работа предполагается постоянной.

Концепция удовлетворения потребностей потребителя с представлением доказательств, что на предприятии и в самой продукции предусмотрены все меры, обеспечивающие намеченное качество, является основой международных стандартов ISO 9000».

Таблица 1.2 - Распределение отказов по этапам жизненного цикла изделия

№ п/п	Объект	Этапы, количество отказов, %		
		КО	ПО	ЭО
1	Самолет	75	16	8,5
2	Изделие	40	20	30
3	Авиационная пром.	33,8	57,4	8,8
4	Автоматическая линия (маховики)	65,5	8,2	26,3
5	Станкостроение	12	88	0
6	Радиоаппаратура	-	20	15

Окончание таблицы 1.2

7	Электронные системы ШФ	26	28	31
8	Электронное оборудование	40	20	30
9	Двигатель (типа ТРД)	51	40	8

ОБОЗНАЧЕНИЯ:

КО - конструктивный отказ;

ПО - производственный отказ;

ЭО - эксплуатационный отказ.

В абсолютных значениях данных, за редким исключением, нет. ПРИМЕР. Общее количество отказов для двигателей (ТРД) "Пратт - Уитни" ~ 1900 отказов на парк 1000 двигателей, т.е.. ~ 1,9отказ/двигатель. Один тип двигателя в СССР - СНГ - ~ 950 отказов на парк ~ 520 двигателей, т.е. 1,8 отказ/двигатель.

Последствия этих отказов самые разные, от незначительных экономических потерь до катастроф.

Примеры отказов по производственно-технологическим причинам:

- сломалось шасси при посадке самолета, причина: снижение выносливости гидроцилиндра из-за наличия в поверхностном слое остаточных, после шлифования, напряжений растяжения;

- разрушение двигателя из-за разрушения диска компрессора, причина: снижение выносливости материала диска из-за инородного включения в отливку для штамповки;

- разрушение двигателя из-за поломки его вала, причина: снижение выносливости вала из-за повреждения поверхности глубиной 0,3 мм вследствие поломки резца при точении;

- отсутствует изображение в телевизоре, причина: несплошность электрического контакта при пайке и т.п.

ВЫВОДЫ:

- отказы в эксплуатации имеются, несмотря на наличие в производстве специальных, сдаточных и др. испытаний и системы контроля;
- доля отказов по конструктивным и производственно - технологическим причинам значительна;
- экономический потери из-за отказов могут быть значительными;
- отказы произошли по скрытым дефектам.

Рисунок 1.2 - распределение отказов по наработке изделий

Предоставление количества отказов (интенсивность отказов) в виде графика в зависимости от времени наработки является классическим примером распределения отказов. Важно при этом, что эти отказы имеют производственно-технологические причины.

Можно отметить следующее:

- отказы по производственно-технологическим причинам возникают во всем периоде эксплуатации изделия. Так, например, вал двигателя сломался из-за повреждения поверхности, связанной с поломкой резца; при точении на наработке в ~2500 час на 4-й год эксплуатации двигателя; шасси самолета сломалось из-за остаточных напряжений растяжения на 5-й год эксплуатации самолета; телевизор отказал из-за малого контакта припоя с поверхностями контактирующих элементов через 8 лет эксплуатации и другие примеры;

- 50 % отказов возникают в первый интервал времени работы изделия, т.е. либо в первый год эксплуатации, либо в первые часы работы изделия. Увеличение времени испытаний является экономическим вопросам, в частности для некоторой военной техники увеличение времени стендовых испытаний значительно, иногда в 2-3 раза, сокращает ресурс изделия;

- испытания не способны выявить все скрытые дефекты.

1.1.3 Почему испытания не выявляют всех скрытых дефектов?

Конструкторской документацией предусмотрены требования к проведению испытаний каждого изделия и его составных частей. Этими испытаниями подтверждаются, прежде всего, параметры назначения данного изделия, например, тяга и режимы работы двигателя, взаимодействие отдельных частей какого-либо устройства, например - шасси, функционирование элементов управления курсом самолета, срабатывание клапана, производительность насоса, ход часов, наличие изображения и звука в телевизоре и т.п. При этих испытаниях естественно выявляются многочисленные дефекты, которые следует уже считать явными, известными, дефектами. Однако, ряд дефектов не могут быть выявлены при такого рода испытаниях.

Практика показывает, что подавляющее число, если не все, отказов по производственно-технологическим причинам произошли при обычных, не экстремальных, условиях эксплуатации изделия. Поэтому при стендовых испытаниях не хватает только времени для выявления скрытого дефекта. Но, когда такое время наступит? Например, гайка болта не зашплинтована. Когда отвернется гайка? Неизвестно. Следующий пример: трубопровод в самолете или на двигателе проложен относительно любой радом расположенной детали с зазором меньше заданного по конструкторской документации. От вибраций при эксплуатации объекта будет или нет касаться трубопровод поверхности соседней детали? - Неизвестно. Если будет касаться, то когда произойдет износ стенки трубопровода до утраты герметичности? - Неизвестно.

Нельзя определить с необходимой точностью время наступления усталости материала, например, от местного повреждения поверхности в виде риски, царапины, забоины, зареза и т.п., от наличия и величины остаточных напряжений растяжения и т.д.

Нельзя определить с достаточной точностью снижение износостойкости пары деталей при наличии шаржирования. Время наступления негерметичности при разрушении стенок между несплошностями материала, например, между отдельными парами в отливке, также непредсказуемо. Одновременно, в ряде случаев условия испытания не соответствуют или не имитируют наихудшие условия работы изделия. Например, при испытании на герметичность детали, узлы не подвергаются всему сочетанию нагрузок, которые могут встретиться при работе объекта; рабочее тело при испытании не соответствует рабочему телу при работе объекта, в частности, при испытании применяют воду, а при работе объекта применяется масло и т.п.

Отсюда следует, что такие технические и физические свойства как усталостная прочность, износостойкость, теплопроводность, герметичность, коррозионная стойкость и др. могут быть подтверждены или проверены только натурными длительными испытаниями на заданный ресурс. Естественно, такие испытания могут быть только периодическими или выборочными.

Такие свойства, как безотказность и долговечность каждой единицы изделия могут быть предположительно оценены только по результатам многих испытаний с обработкой данных статистическими методами и подтверждены результатами эксплуатации данного изделия.

Из практики известно, что скрытые дефекты одного вида, даже повторяющиеся, имеются не в каждом изделии, поэтому отбор изделия на длительные испытания со скрытым дефектом данного вида является маловероятным событием. Например, повреждение резинового уплотнительного кольца круглого сечения при его сборке в соединение по ГОСТ 9833-73 является случайным событием (частота отказа до 2,5 % для

одного вида изделия), соответственно, отбор на длительные испытания изделия с таким скрытым дефектом есть очень маловероятное событие.

ВЫВОД: стендовые и другие виды испытаний не исключают пропуск скрытых дефектов в каждом изделии. Ответственность производителя продукции не заканчивается сдачей изделий в эксплуатацию.

1.1.4 Эффективность контроля требований конструкторской документации

Необходимо четко уяснить, что не только невозможно получить продукцию 100 %-ного качества, но и нельзя быть при любой системе контроля полностью уверенным, что принята именно такая продукция.

Есть несколько весьма важных причин, снижающих эффективность контроля.

В частности:

а) "... психофизический фактор является ограничительным фактором, эффективность которого не может быть поднята выше уровня 80%..."

Отсюда следовал логический вывод о количестве постов контроля одного и того же требования. Покажем этот вывод на графике. Данные в таблице.

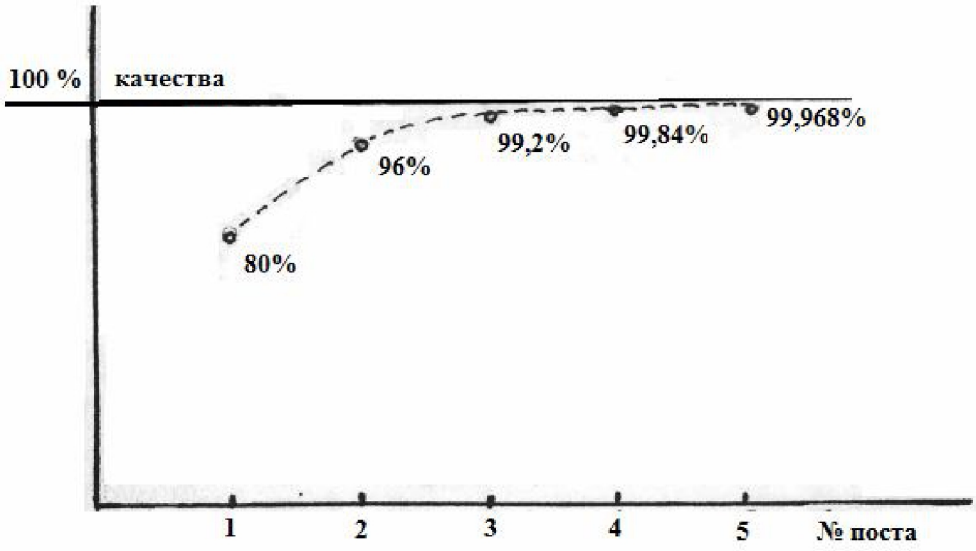


Рисунок 1.3

Таблица 1.3 – Влияние количества постов контроля на его эффективность

Пост	Остаток невыявленных дефектов от предыдущего поста	Добавка к результату контроля от предыдущего поста	Итоговая сумма
1	100 – 80= 20 %	80%	80%
2	100 – 96=4 %	20·80 % = 16 %	96 %
3	100 - 99,2 =0,8 %	4·80 % = 3,2%	99,2 %
4	100 - 39,84= 0,16 %	0,8·80 % = 0,64	99,84 %
5		80 % = 0,128	99,968 %

Приняв эти рассуждения с большими условностями предлагали устанавливать 3...4 контрольных поста, при этом эффективность контроля соответственно 99,2...99,84

Естественно, такое введение дополнительных полетов увеличивает экономические потери.

Уже сегодня на некоторых предприятиях число контролеров достигает до 12...15 % от числа производственных рабочих.

В другом исследовании указывается, что инспектор, контролер может лишь с 85- процентной вероятностью обнаруживать ошибки, если эти ошибки случаются нечасто, например, с частотой 1 % или менее.

В следующем исследовании показано, как меняется вероятность обнаружения ошибки в зависимости от числа дефектов в предъявляемой продукции.

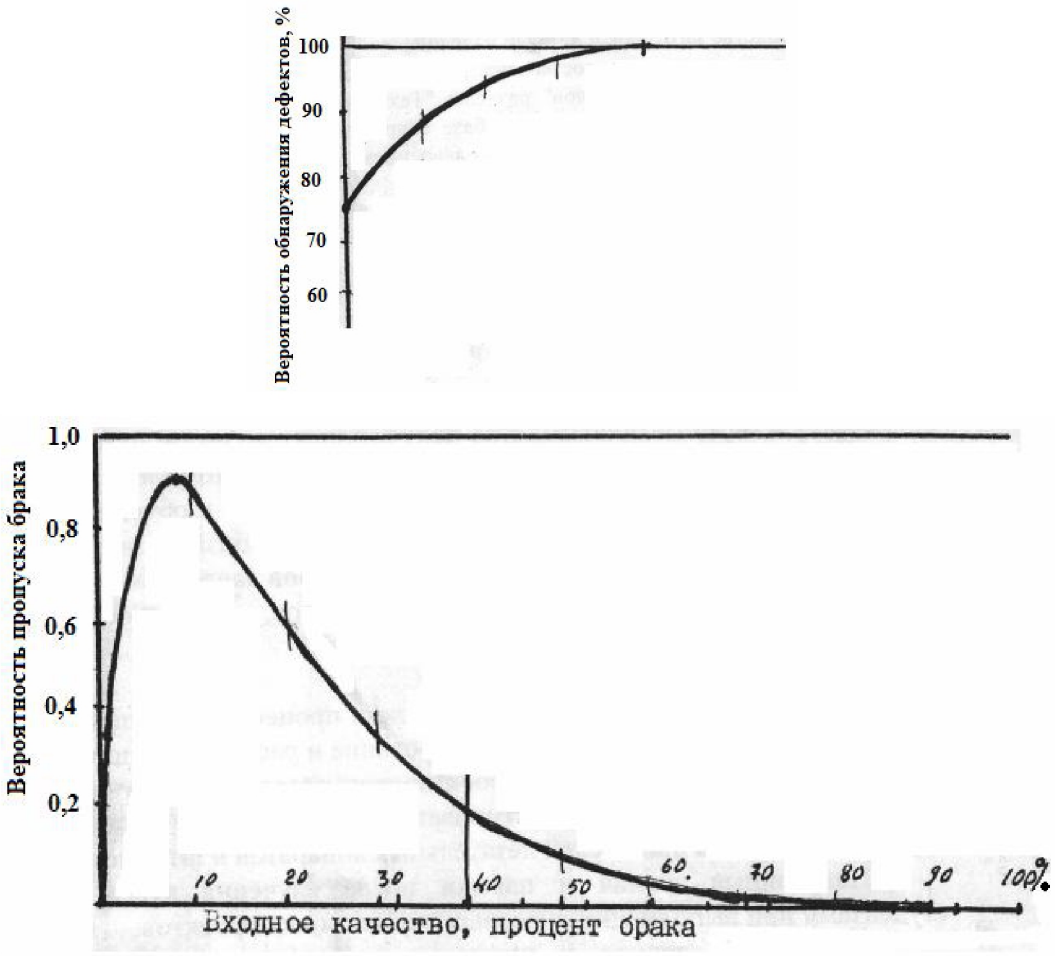


Рисунок 1.4

Вероятность обнаружения дефектов при входном качестве на уровне до ~ 3 % дефектов составляет ~ 80 % . Вероятность обнаружения дефектов повышается до ~ 100 % при входном качестве с ~ 40 % дефектов. Вероятность пропуска брака максимальная при входном качестве с ~ 7 % дефектами. Проведены исследования достоверности контроля на специфичных оригинальных деталях особо сложных изделий за многолетний период. Производилась перепроверка деталей, принятых ОТК, проведена систематизация данных по видам требований конструкторской документации (КД).

Таблица 1.4 – Данные перепроверки деталей в ОТК

Вид требования КД	Достоверность контроля, %
▱, прилегание по краске	99,0
↗, ⊥, ⌖,	83,2
Линейные размеры, (мех. обработка)	95,6
▽,√	95,2
Геометрия фасок, галтелей, кромок	99,1
Несплошности материала отливок	93,3
Сортировка из группы резьб	100,0
Линейные размеры (отливка)	76,7
Чистота поверхностей	93,0
Дефекты покрытия (гальванопокрытия)	100,0
По качеству пайки (электрожгуты)	98,6
Повреждения поверхностей	98,0
Идентификация макроструктуры	100,0
Дефекты поверхности резиновых колец круглого сечения	97,4

Достоверность того, что в принятых деталях дефекта нет, равна 88 %. Большинство требований КД приняты с достоверностью контроля 95,0…100 %. Более низкая достоверность контроля указывает на наличие организационно-технических недостатков, которые в принципе могут быть выявлены и устранены.

При этом следует иметь в виду, что методика контроля, установленная КД и ТД, предусматривает оценку качества гальванопокрытий по внешнему виду, прочность сцепления покрытия с основой не контролируется, аналогично не проверяется прочность пайки каждого провода с наконечником.

Средняя достоверность контроля, по этому исследованию, составляет 98,3 %, что с учетом некоторых дополнительных условий предполагает до ~1200 скрытых дефектов в изделии;

б) организационно-технологические недостатки. Такие недостатки могут быть выявлены специальным анализом и некоторые из них специфичны.

Наиболее характерные недостатки для машиностроительных предприятий:

- метрологическая неграмотность технологов, контролеров. Допустимая погрешность часто не регламентируется конструкторской документацией. На ряде предприятий допустимая погрешность измерения регламентируется приказом по предприятию введением известных НТД, например, ГОСТ 8.061-79 и РТМ.

Исследованием установлено, что наихудшее положение в применении правил выбора измерительных средств отмечается при контроле геометрических параметров в операциях сборки и отливок.

Так, например, резиновые манжеты должны иметь осевой натяг в 0,1 мм. Для его определения производят 2 измерения штангенциркулем с ценой деления 0,1 мм, который может иметь погрешность измерения до 0,2 мм.

Другой вариант - применение приспособлений или калибров, например, комплексных, не учитывающих возможную комбинацию нарушений. Имеются случаи, когда комплексный калибр резьбы подтверждает годность деталей при совокупности нарушений геометрических параметров.

Контролем не были выявлены детали с углом профиля резьбы 75...80° вместо 60°, а в другом случае - с шагом резьбы 1,9 мм вместо 2,0±0,02 мм;

- назначение технического контроля требований с последующим назначением операций с силовым, тепловым или химическим воздействием, которое может привести к искажению данных контроля, при этом окончательный контроль этих требований отсутствует.

Например, после контроля параметров детали были назначены операции сверления, фрезерования пазов, нарушающие внутреннее равновесие напряжений в металле, что привело к искажению ранее измеренных параметров. Это искажение не выявлено, так как не было окончательного контроля.

Наиболее частым нарушением является применение контроля на станке непосредственно после выполнения операции в зажатом состоянии детали;

- неправильно задаются, формируются условия изготовления суммы деталей одного наименования, определяемых как партия, при назначении выборочного контроля. Например, при цементации нескольких шестерен в одной садке образец-свидетель должен имитировать форму и размеры детали и располагаться в зоне с наихудшими для процесса условиями цементации. На практике часто эти условия не выполняются.

Другой пример: нет режущих свойств в маникюрных ножницах, твердость режущих кромок ниже требований КД. Причина: заключение о годности, т.е. о соответствии твердости требуемой КД, было дано при выборочном контроле нескольких деталей после закалки; детали при термообработке были в большом количестве, "кучей" на поддоне, внутри "кучи" не было нужного прогрева, дефектные детали в выборочный контроль не попали;

Еще примеры: отливка лопаток с направленной кристаллизацией. Шихта готовится на всю партию лопаток, а расплав ведется отдельно для каждой (или 2-х) детали. Поэтому попадание в шихту другого материала не будет выявлено при выборочном контроле; отливка деталей из титановых сплавов, контроль на отсутствие альфированного слоя ведется по образцу-свидетелю, не имитирующего конфигурацию деталей. Кроме того, удаление

альфированного слоя осуществляется травлением не одновременно всей партии отливок;

- метод контроля предполагает выявление дефекта только в случае совпадения дефекта и нужного пространственного положения детали, что предопределяет отработку методики контроля. На практике отработка осуществляется на основе обратной связи, т.е. в случае выявления скрытого дефекта последующими операциями или испытаниями, а также при отказе изделия.

Например, рентген контроль в целях выявления пор, раковин и и.п. несплошностей, проверка структуры материала, отсутствие альфированного слоя, выявление несплошностей разрезкой одной детали на отдельные элементы в периодическом контроле (неизвестно, где резать), и др.;

в) невозможность контроля. Исследованием отказов особо сложного изделия установлено, что 40 % скрытых дефектов, приведших к отказам, не могли быть выявлены, т.к. результаты операций контролю не предъявлялись из-за отсутствия методики контроля. Нельзя проверить:

- отсутствие повреждений на поверхностях деталей после их сборки в недоступных для осмотра местах, например, состояние поверхности резиновых колец круглого сечения или резиновых манжет после их сборки,

- глубину расположения несплошности в отливках методом рентген контроля, если габарит контролируемого элемента в нужном положении превышает предельный,

- сплошность пайки провода к наконечнику,

- прочность покрытий с основой,

- качество точечной или роликовой сварки, и т.п.

ВЫВОДЫ:

- эффективность контроля ниже 100 %;

- объективно снижают эффективность контроля психофизический фактор, отсутствие методов контроля ряда требований КД.

1.1.5 Некоторые заблуждения при обеспечении качества продукции в технологической системе

ЗАБЛУЖДЕНИЕ 1: все скрытые дефекты формируются на финишных операциях. Для большинства изделий действительно значительное число скрытых дефектов закладывается на финишной операции. В частности, до 1/3 всех производственных отказов вызвано скрытыми дефектами после оборки, до 1/7 - отнесено на счет вспомогательных операций очистки и промывки от посторонних частиц (для двигателя). Остальные, т.е. более 1/2 всех производственных отказов вызваны скрытыми дефектами во всех других операциях, включая заготовительные и контрольные.

Предпосылкой для образования скрытых дефектов при сборке является то обстоятельство, что при выполнении операций исполнитель не видит результата своего труда. Например, при постановке резинового уплотнительного кольца в радиальном или торцевом уплотнительном устройстве исполнитель видит, как установлено кольцо на шток, нанес смазку, выправил его и т.д., но исполнитель не видит, как установилось кольцо после сборки, отсутствуют ли повреждения поверхности кольца.

Аналогично, при сборке резиновой манжеты. Еще одна предпосылка для образования скрытых дефектов - это неопределенность в результате при выполнении операции.

Например, при сборке соединения " резьбовая пробка + канал корпуса", резьба метрическая с тугой посадкой или с зазором, на грунт или композицию, сборка на сбег резьбы, контроль герметичности заданным методом, имеются неопределенности по чистоте обезжиривания, по составу наполнителя и количеству растворителя, по толщине слоя грунта или композиции с учетом малого диаметра канала (резьбы М3, М4, М5, М6), при отрезке излишней части пробки возможно ее отворачивание при зачеканке не видно устранение зазора в соединении и др., организационные обстоятельства, (операция сушки 36 час, длительности оборки ~10 мин; в случае негерметичности требуется ремонтный вариант с длительностью работ 7...10 суток).

Аналогично, при развальцовке, при нанесении покрытий, при точечной или роликовой электросварке, при клепке, при пайке провода к наконечнику и т.п.

Предпосылкой к производственным отказам является также наличие в процессе обеспечения физических или других явлений, противодействующих эксплуатационному свойству. Например, при приготовлении расплава металла увеличивается его газонасыщение, а в отливке происходит усадка, газовыделение, проявляющиеся в виде несплошности (пор, раковин и т.п.) материала, что создает сомнения в обеспечении герметичности.

Наличие таких предпосылок проявляется частотой отказа 0,1… 3,0 %.

ЗАБЛУЖДЕНИЕ 2: все отказы - это нарушение самых точных требований КД.

Под понятие "...самые точные..." чаще соотносят требования соизмеримые с техническими возможностями предприятия.

Однако, на другом предприятии, имеющим более широкие технические возможности, соответственно понятие " ...самые точные..." смещено.

В КД самые точные требования обеспечивают кинематические свойства, а по надежности - долговечность.

Например, посадки под подшипники, а в самых подшипниках обеспечивают долговечность некруглость беговой дорожки не более чем несколько микрон. Также расстояние между осями шестерен в редукторе или в часах, зазоры в золотниковых парах и т.д.

Все другие эксплуатационные свойства продукции обеспечиваются требованиями с более широкими допусками.

Обеспечение точных требований вызывает определенные трудности, однако скрытость дефекта по этим требованиям чаще всего предопределяется недостатками метода измерения, в частности, выбранный метод измерения имеет погрешность измерения, превышающую допустимую и др.

В сложной продукции отказы происходят по различным свойствам. Например, в двигателе ТРД около 1/2 отказов - это негерметичность из-за

скрытых дефектов при выполнении требований по сплошности материала, повреждения поверхности, недозатяжка резьбовых соединений, при установке в упор деталей из-за нарушения фасок и галтелей до 1/3 отказов - это ограничения в движении, заклинивание подвижных пар, типа золотников, клапанов, вала в подшипниках скольжения и т.п., из-за загорания посторонними частицами. Скрытые дефекты из-за невыполнения наиболее жестких требований, в частности - неплоскостности до 0,0003 мм, прилегание по краске, привели к ~1/20 от суммы производственных отказов.

Наличие скрытых дефектов по размерам 6, 7, 8 квалитетов точности не установлено.

ЗАБЛУЖДЕНИЕ 3. Во всех скрытых дефектах и дефектах вообще виноват исполнитель (оператор). Долгое время так и полагали. Поэтому саратовскую систему управления бездефектным изготовлением продукции (БИП) ориентировали на исполнителя. За короткое время, не более года, выяснилось и дальнейшими исследованиями подтвердилось, что ошибки исполнителя составляют 9...20 % от суммы всех причин. Остальные причины зависят от инженерно-технического состава. Некоторые причины дефектов не зависят от предприятия, например, поставки материала с отклонениями от требуемых свойств, поставки дефектных комплектующих деталей, агрегатов, приход на предприятие молодых рабочих из ПТУ, дефекты оборудования,т.п.

Так, например, на одном из предприятий количество явных (известных) дефектов за год увеличилось на 3,2 % только за счет прихода на завод 39 новых молодых рабочих. На другом предприятии на 14,6 % снизилось количество безотказной продукции при удвоении плана выпуска этих изделий.

ЗАБЛУЖДЕНИЕ 4 - дайте немного времени и мы обеспечим 100 % требований КД.

Сразу факты: ни один самолет, ни один двигатель, ни один автомобиль (в России, СНГ) не изготовлен без дефектов. Даже в Японии, по сообщению

фирмы "Toyota" только 85 % автомобилей этой фирмы не имеют дефектов при выпуске $(9\ldots12)\cdot10^6$ автомобилей в год.

Часто ссылаются на отличные традиции предприятия, сложившуюся систему обеспечения качества продукции» Эти традиции следует рассматривать как традиции в обеспечении соответствия требований КД к началу выпуска первой товарной продукции и традиции в устранении дефектов.

Зарубежная практика указывает, что достижение степени соответствия продукции требованиям КД в 93 % является желательной, приемлемой величиной. Последующие действия системы управления опираются на концепцию.

В настоящий момент европейские государства и США придерживаются экономического подхода. Так, в США, если дальнейшее повышение степени соответствия приводит к снижению экономических затрат на 5- 10% то в США будут заниматься этим, а в Японии - будут повышать степень соответствия до 100%, имея в виду отсутствие жалоб потребителя.

Для нашей практики крупнейшее предприятие авиапромышленности обеспечивает на первом товарном изделии степень соответствия продукции требованиям КД на уровне 98,7 %, что можно считать исключительным достижением, при этом последующая работа по устранению дефектов повысила степень соответствия до 99,3 % через 5 лет, и до 99,9% через 10 лет.

Т.е. на повышение степени соответствия на 1,2 % потребовалось 10 лет, но степень соответствия в 100% не была достигнута. Высокая степень соответствия продукции требованиям КД не обозначает, однако, высокую степень надежности изделий.

Так при степени соответствия продукции требованиям КД на уровне 98,7 % на первых товарных поставках каждое изделие отказывало в эксплуатации, т.е. все 100 % изделий, причем среднее количество отказов на каждое изделие составляло 2,4 отказа/изделие.

Через 10 лет, при степени соответствия 99,9 % уже 86 % изделий не имели производственных отказов. Эти данные показывают тенденцию, что с повышением степени соответствия продукции требованиям КД, повышается надежность изделий. Неадекватность в повышении надежности объясняется рядом причин, в частности:

- скрытые дефекты могут образоваться в любые годы изготовления продукции ввиду неопределенности результата в ряде операций, т.е. не обязательно в первый год изготовления продукции;

- некоторые скрытые дефекты могут привести к отказам только при определенной наработке, т.е. количество таких отказов может быть разным зависимости от изменения значений назначенного ресурса изделия;

- любая система управления требует определенного времени на достижение цели;

- значительное число скрытых дефектов требуют проведение комплекса мероприятий, продолжительность которых по данным исследования автора, равна примерно продолжительности подготовки производства нового изделия и др.

Следует отметить, что превышение 85 % уровня количества изделий без производственных отказов в эксплуатации является исключительно сложной задачей, по крайней мере, требуется новый подход к организации обеспечения качества, основанный на предупреждении скрытых дефектов.

ЗАБЛУЖДЕНИЕ 5 - при полном (100 %) соответствии продукции требованиям КД будет обеспечена надежность продукции, т.е. не будет производственных отказов.

По итогам изготовления и по результатам эксплуатации конструктор систематически уточняет КД. Исследованием производственных причин отказов было установлено, что часть отказов 5,0...16 % от суммы отказов, вызвана явлениями, не учтенными и не регламентированными в конструкторской и технологической документации. Конструктору об этих явлениях может быть неизвестно, а технолог экономно обеспечивает только

заданные требования КД. Эти явления названы нами как сопутствующие явления технологического процесса.

ВЫВОДЫ.

- скрытые дефекты могут быть после всех операций, включая заготовительные и контрольные;

- скрытые дефекты образуются при обеспечении любых требований КД;

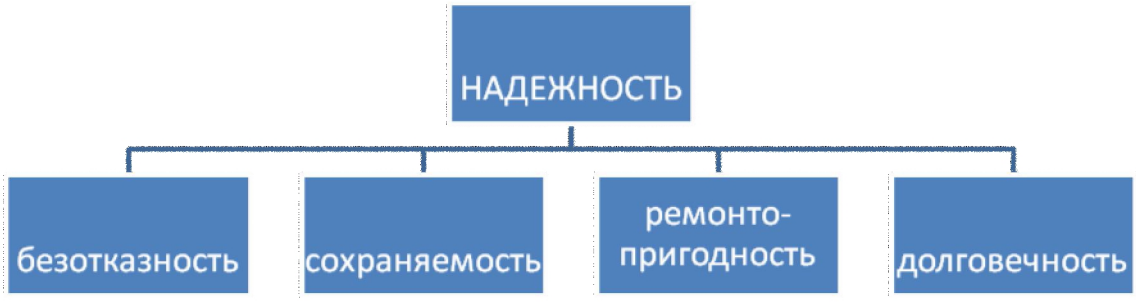
- причины дефектов, в т.ч. скрытых, являются организационно-технические недостатки, ошибки исполнителя не превышают 20 % от суммы всех дефектов;

- концепция большинства европейских стран не предусматривает обеспечения 100-процентной степени соответствия продукции требованиям КД;

- повышение степени соответствия продукции требованиям КД неадекватно повышает надежность изделий;

- конструкторская документация неполная: не учтены сопутствующие явления технологического процесса, и их технологическая наследственность.

Надежность характеризуется 4 группами показателей, каждый из которых определяется определенными параметрами:



• вероятность безотказной работы P(t); • интенсивность отказов λ(t); • средняя наработка до отказа T_{CP}; • наработка на отказ $T_{НАР}$. (первые три пункта относятся к неремонтируемому двигателю, последние к ремонтируемому.)	средний срок сохраняемости; γ-процентный, срок хранения.	вероятность восстановления работоспособнос-ти; среднее время восстановления.	ресурсы; срок службы.

Безотказностью называется свойство изделия сохранять свою работоспособность в течение некоторой наработки без вынужденных перерывов.

Вероятность безотказной работы есть вероятность того, что в заданный интервал времени или в предел заданной наработки не произойдет отказа изделия.

$$P(t) = \frac{N - n}{N},$$

где N – количество изделий в начале испытаний или эксплуатации:

n – число изделий, вышедших из строя за время испытания t.

Вероятность отказа Q(t) = 1 – P(t)

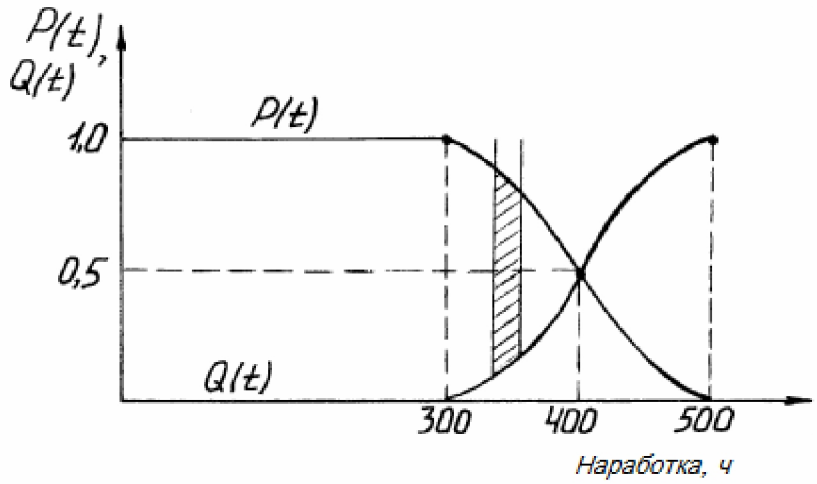


Рисунок 1.5 – Закономерность изменения P(t) и Q(t) по времени наработки

Интенсивность отказа есть вероятность отказа, неремонтируемого двигателя в единицу времени

$$\lambda(t) = \frac{\Delta N}{N(t) \cdot \Delta t}, \qquad \left[\frac{1}{час}\right]$$

где ΔN – количество изделий, вышедших из строя в течение рассматриваемого промежутка Δt;

N(t) – число изделий, оказавшихся работоспособными к началу наступления Δt.

Δt=350-320=30, (час);

N=10, N(t)=8, ΔN=1

$$\lambda(t) = \frac{1}{8 \cdot 30} = \frac{1}{240} \left[\frac{1}{час}\right]$$

λ(t) – есть характеристика, показывающая какая часть изделия выходит из строя в единицу времени.

Как показывает опыт, применительно к авиационным двигателям характер изменения интенсивности отказов по времени имеет следующий вид (рис. 1.6).

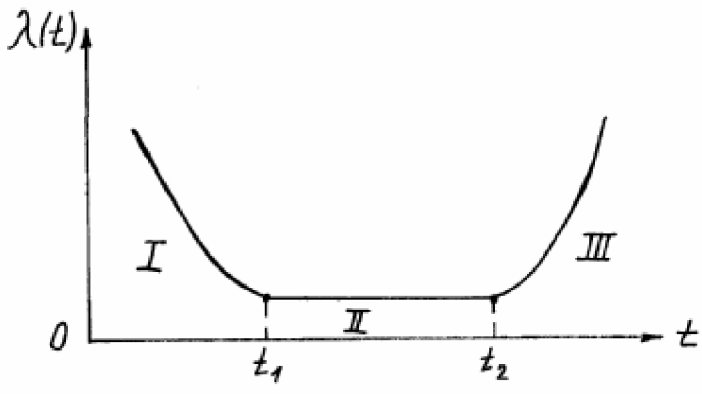


Рисунок 1.6 – Изменение интенсивности отказов во времени

I. Период приработки.

II. Период нормальной эксплуатации.

III. Период старения.

Отказы в первом периоде носят преимущественно конструктивно-технологический характер. Причины этого следующие:

- недостаточная подготовленность конструктора;

- несовершенство опережающей поузловой проверки агрегата и узлов двигателя на стенде;

- малое число изделий и недостаточная наработка до внедрения в серийное производство;

- отставание технологии от нужного конструктору уровня;

- специфика серийной технологии (рассеивание параметров).

Во втором периоде причины отказа следующие:

- эксплуатационная не технологичность;

- нарушение правил эксплуатации;

- несвоевременность или несовершенство информации о внезапных отказах и поведении двигателя.

В третьем периоде причины связаны с выработкой ресурса агрегатов и двигателя в целом.

Средняя наработка до отказа – это ожидаемое время исправной работы изделия в партии до его первого отказа.

Наработка на отказ – (это понятие, относящееся к ремонтируемым двигателям) это есть время наработка двигателя между двумя отказами.

Сохраняемость – свойство изделия сохранять обусловленные эксплуатационные показатели в течение и после срока хранения и транспортировки, который установлен в технической документации (средний срок сохраняемости).

γ – процентный срок сохранности – период сохранения эксплуатационных показателей, которые имеют обусловленное число процентов изделий данного типа. Это срок сохранности, достигаемый изделием с заданной вероятностью γ, выраженной в %.

Ремонтопригодность – свойство изделия, заключающееся в его приспособленности к предусмотрению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путем проведения технологического обслуживания и ремонта.

Долговечность – свойство изделия сохранять свою работоспособность до наступления предельного состояния при установлении системы технического обслуживания и ремонта.

Технический ресурс – наработка изделия от начала эксплуатации или ее возобновления после ремонта до предельного состояния, оговоренного в технической документации.

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации до списания (перехода в предельное состояние).

1.1.6 Работа по обеспечению надежности на этапе создания нового двигателя

Работа по обеспечению надежности в КБ проходит в три этапа. На первом этапе формируются требования к надежности (ТЗ). Второй этап (математический), при котором на базе вероятностно-статистического подхода определяются показатели надежности (прогнозируются), при этом сама надежность рассматривается как вероятность безотказной работы. При этом имеют место следующие сложности: статистические методы опираются

на понятие массовости событий, а на стадии проектирования двигателя этого нет.

Третий этап (инженерно-физическое обеспечение надежности) устанавливает зависимости основных показателей надежности от физических параметров деталей, от интенсивности эксплуатации воздействий и от изменений этих параметров во времени. На этом этапе используются средства диагностики, испытания проводятся на узлах и агрегатах, в результате получаются уточненные расчеты параметров прочности и нагрузки.

Особо важно учитывать затраты (цену) надежности.

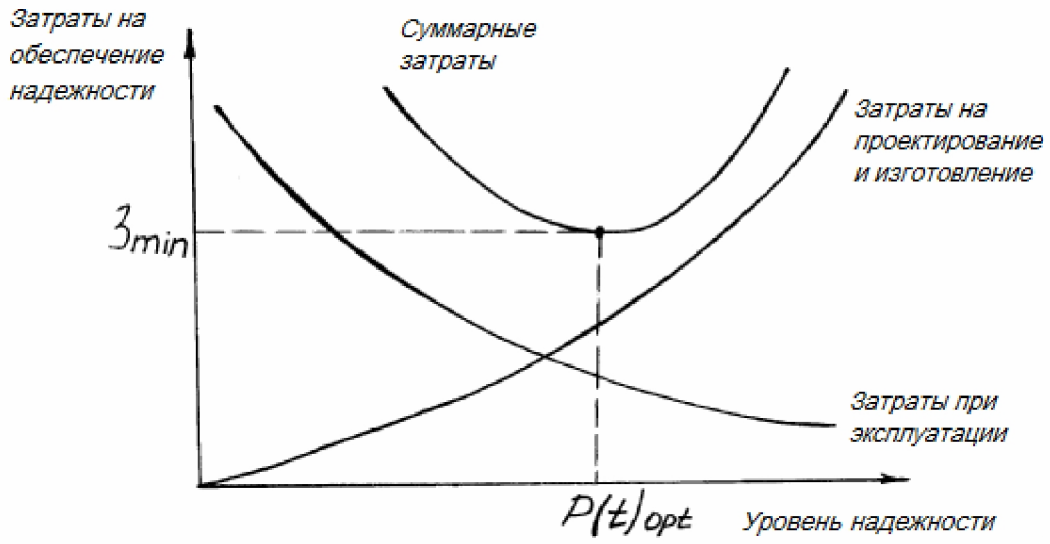


Рисунок 1.7 – График зависимости затрат на создание и эксплуатацию изделия от уровня его надежности

Наука о надежности ДЛА изучает и предлагает условия и методы обеспечения надежности изделия и решает следующие задачи:

- систематизация отказов и изучение их причин, выяснение физических закономерностей появления отказов;

- изыскание способов обеспечения надежности при проектировании, изготовлении и эксплуатации изделия;

- разработка качественных методов оценки надежности;

- управление и организация комплекса работ по обеспечению надежности изделия.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ

Надежность — временная категория

Сущность решения проблемы обеспечения надежности изделий заключается в изучении физических причин появления и закономерностей развития отказов, рассматриваемых в качестве случайных событий, возникающих и изменяющихся во времени, и разработка на этой основе научных и инженерных методов создания изделий с заданным в соответствии с требованиями уровнем надежности. Поскольку отказы как случайные события имеют вероятностный характер зависимости от времени, то для изучения их закономерностей применимы теория вероятностей и теория математической статистики.

Конкретный вид этих закономерностей для отдельных изделий определяется характером влияния различных физических факторов на природу возникновения и развития отказов. В числе таких факторов могут быть износ и старение материалов элементов изделия, накопление усталостных повреждений, наличие производственно-технологических дефектов (прижоги и перегревы), неоднородность материалов, наличие местных концентраторов напряжений, трещины, волосовины, а также несоответствие фактических условий и нагружений расчетно-допустимым, превышение предельно допустимых параметров (температуры газа, частоты вращения, вибраций и др.) при эксплуатации изделий.

Отказы изделий имеют разнообразные формы проявления. К числу наиболее характерных проявлений отказов можно отнести отклонения выходных параметров функциональных систем или их агрегатов от нормативных значений (например, по тяге, необходимой для заданного режима полета) или выход параметров за установленные ограничения (например, по температуре газа перед турбиной или по удельному расходу топлива); проявление отказов может быть также в виде механических повреждений, приводящих к появлению трещин, поломок или деформаций, а

также в виде рассогласования взаимодействия регулирующих и управляющих систем, снижения точностных характеристик и т.п. В конечном счете происходит ухудшение или резкое изменение свойств безотказности и долговечности изделия.

Таким образом, из результатов рассмотрения возможных последствий отказов в зависимости от их характера развития и проявления различают следующие условные формы надежности:

- *функциональную,* когда изделие не способно выполнять заданные функции;

- *параметрическую,* когда выполняемые функции не удовлетворяют требованиям высокой точности, экономичности и эффективности;

- *прочностную,* когда происходят повреждения и поломки и не обеспечивается необходимая долговечность.

Характеристики изменения отказов многих авиационных изделий по времени их эксплуатации имеют сложные зависимости. Статистические данные показывают, что многим изделиям свойственны три типичных периода их эксплуатации, которые характеризуются различным уровнем интенсивности отказов и разными закономерностями их проявления: 1) приработка (начальный период эксплуатации), 2) период нормальной эксплуатации, 3) период износа и старения. Под износом в данном случае понимается не только физический износ, но и накопление любых необратимых повреждений. Протекание функции $\lambda(t)$, соответствующее этим трем периодам изменения интенсивности отказов, имеет характерный вид, показанный на рис. 1.10. Такие кривые изменения интенсивности отказов по наработке принято называть λ-характеристиками.

Первый участок (I) λ-характеристики отличается повышенным уровнем интенсивности отказов. В начальный период наработки изделия происходит приработка его составных частей. Благодаря постоянному проведению работ по совершенствованию двигателей идет процесс

«выжигания» отказов, и интенсивность отказов по времени применения изделия падает.

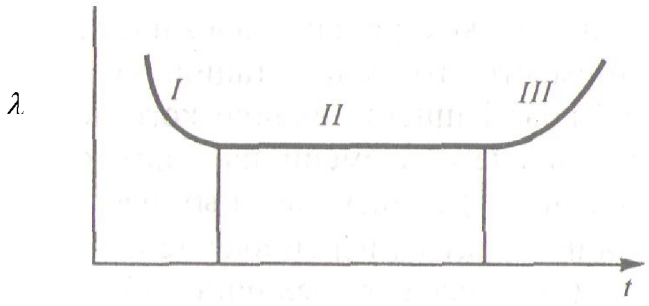


Рисунок 2.1 - Типичная λ - характеристика

Причиной повышенного уровня отказов в начале эксплуатации является главным образом недостаточное совершенство методов контроля, приводящее к тому, что изделия со скрытыми дефектами выходят из строя вскоре после начала работы. Основное средство снижения интенсивности отказов в этот период эксплуатации — совершенствование контроля выпускаемых изделий и повышение эффективности заводских испытаний готовой продукции. Период приработки обычно непродолжителен и часто полностью перекрывается периодом обкаточных или приработочных испытаний.

На втором участке (II) интенсивность отказов по времени эксплуатации остается постоянной; этот период значительно продолжительнее первого и третьего и называется **периодом нормальной эксплуатации.**

В этот период работы изделия нельзя повысить надежность путем замены каких-то элементов, так как причины отказов при нормальной эксплуатации связаны главным образом с внезапным воздействием неучтенных при проектировании изделия факторов, с попаданием изделия в такие эксплуатационные ситуации, последствия которых не были достаточно хорошо предусмотрены и проверены.

Величина интенсивности отказов в этот период обусловлена действием таких объективных факторов, как стабильность свойств материалов и

соответствие фактических условий работы изделия заданным. Она также зависит от совершенства реализованных методов проектирования и производства.

Нормируемый уровень допустимой величины интенсивности отказов наряду с этими факторами зависит также от соотношения стоимостных затрат на стадии создания и эксплуатации изделий. Из графика, представленного на рис. 2.2, следует, что уровень надежности изделия пропорционален величине затрат на его разработку и изготовление. Действительно, при малых затратах на создание трудно обеспечить хорошую конструктивную разработку и качественное изготовление изделия.

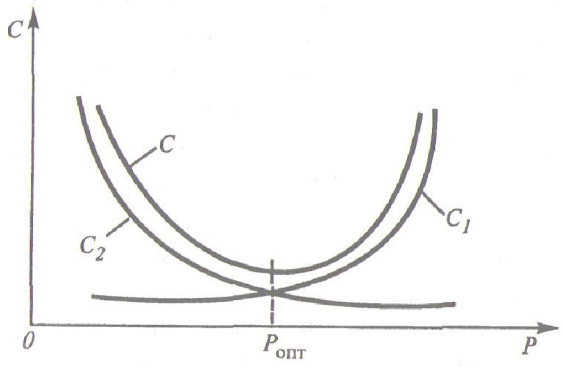


Рисунок 2.2 - График зависимости стоимости создания и эксплуатации изделия от уровня его надежности: C - общая стоимость; C_1 – стоимость изготовления изделия; C_2 – стоимость эксплуатации; P – уровень надежности

В то же время при низком уровне надежности создаваемого изделия повышается стоимость его эксплуатации, так как ненадежные изделия имеют низкий коэффициент технического использования, требуют больших затрат рабочего времени на подготовку изделия к эксплуатации и повышенного расхода запасных частей.

При суммировании затрат на изготовление и эксплуатацию определяется минимальная (оптимальная) величина общих затрат для реализуемого уровня надежности. Этот уровень обычно и задается в требованиях на разработку новых изделий, однако для многих изделий авиационной техники нормирование заданного уровня только по оптимуму

экономических затрат недостаточно, необходимо учитывать требования обеспечения высокого уровня безопасности.

Уровень надежности вновь создаваемого изделия в значительной степени определяется полнотой и объемом расчетов надежности конструктивных разработок изделия на этапе проектирования.

Третий период (III, см. рис. 2.1) называется **периодом износа и старения**. В этом периоде интенсивность отказов начинает возрастать. Появляются отказы, вызываемые старением и износом материалов отдельных элементов изделия. В конце периода вследствие приближения к предельному техническому состоянию эксплуатация изделия становится небезопасной или нерентабельной и поэтому она должна быть прекращена. Изделие направляется в ремонт или списывается. Замена износившихся элементов и ремонт изделий — основной путь повышения надежности в этот период. Изучение временных закономерностей возрастания отказов — одна из важных задач теории надежности.

Типичная для авиационного двигателя зависимость изменения во времени его надежности в процессе длительной эксплуатации с ремонтами представлена на рис. 2.3. Уровень надежности отдельного изделия, т.е. вероятность P его безотказной работы за время полета, незначительно снижается, так как происходит износ материалов и накопление усталостной повреждаемости, но при выполнении ремонтов в моменты времени t_1, t_2, t_3 ... увеличивается количество N заменяемых агрегатов.

При изучении зависимости изменения уровня надежности во времени необходимо четко определять периоды эксплуатации изделия.

Для *AD* характерными периодами, используемыми для анализа надежности, являются время одного полета $t_П$ и время между ремонтами $t_Р$. В связи с применением метода эксплуатации двигателя по фактическому состоянию понятие **общий ремонт двигателя** претерпело существенное изменение. **Блочная** или **модульная** конструкция двигателей позволяет в процессе их эксплуатации в случае возникновения отказов или выработки

установленного числа нагружений заменять отдельные блоки или модули без отправки двигателя в ремонт, в отдельных случаях даже без снятия двигателя с самолета: вводится дифференцированное время допустимого нахождения в эксплуатации отдельных блоков или модулей $t_{БЛ}$.

В соответствии с действующими регламентами технического обслуживания осуществляется осмотр и проверка технического состояния двигателя и систем силовой установки и устраняются выявленные неисправности, такие как, например, нарушение герметичности, разрегулировка, внешние повреждения и др. Таким образом, перед каждым очередным полетом восстанавливается снизившийся в течение предыдущего полета уровень надежности изделия. В отдельных случаях проводят замену неисправных агрегатов и даже модульных блоков. Однако восстанавливаемый уровень надежности во многих случаях не достигает исходного, так как при подготовке самолета и двигателя к очередному полету не может быть устранено воздействие на состояние отдельных узлов и деталей таких факторов, как износ трущихся поверхностей, старение теплоизолирующих, герметизирующих, защитных и других материалов. Эти неисправности могут быть устранены только при капитальном ремонте двигателя.

Поэтому представленную на рис. 2.3 зависимость можно рассматривать лишь условно гладкой, так как с учетом работ, выполняемых перед каждым полетом, уровень безотказной работы после незначительного снижения практически восстанавливается, т.е. для одного полета его изменение аналогично характеру зависимости на участке $0—t_1$, для второго полета — на участке $t_1—t_2$, для третьего полета — на участке $t_2—t_3$.

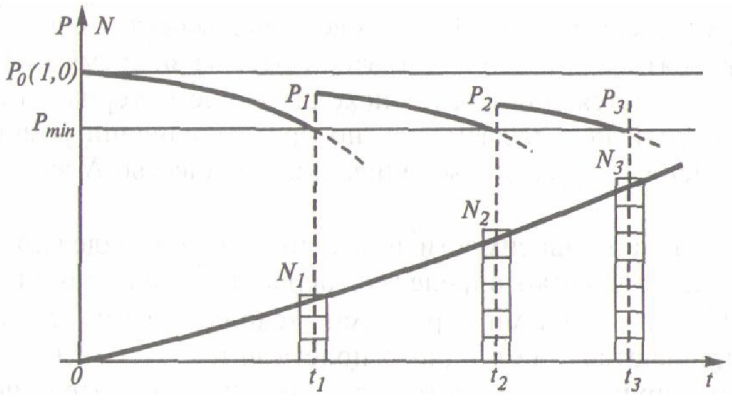


Рисунок 2.3 - Зависимость вероятности безотказной работы P ремонтируемого изделия от времени эксплуатации t (N-количество замененных узлов при ремонте)

Из анализа графиков следует, что в течение эксплуатации уровень надежности двигателя постепенно снижается от начальной величины P_o до минимально допустимой P_{min} на первом этапе эксплуатации, когда текущий уровень надежности превышает P_{min}, межремонтный срок равен t_1. В момент времени t_1, когда уровень надежности достигает P_{min}, эксплуатация изделия прекращается, и оно направляется на ремонтные базы или ремонт производится на месте. При этом заменяют ряд агрегатов и узлов, вышедших из строя или выработавших свой ресурс.

Пусть количество замененных при первом ремонте агрегатов и узлов равно N_1 ; при этом уровень надежности повышается до P_1. Однако из-за снижения уровня надежности остающихся основных узлов общий уровень надежности изделия меньше первоначальной величины P_0. Изделие вновь поступает в эксплуатацию и используется до момента N_2, пока уровень надежности снова не снизится до P_{min}. Проводится второй ремонт с заменой N_2 агрегатов. И так может повторяться несколько раз до тех пор, пока восстановление уровня надежности станет или невозможным или невыгодным из-за необходимости замены большого количества узлов.

Таким образом, подтверждается неразрывная связь уровня надежности со временем применения изделий и развитие отказов как случайных событий.

Вернемся к λ-характеристикам изделий (см. рис. 2.1). В практических задачах надежности λ-характеристики элементов и систем имеют большое значение. Объективное решение таких вопросов, как правильное назначение величины ресурса, сроков и содержания регламентных работ, некоторых вопросов, связанных с обеспечением заданной надежности проектируемого изделия и других, требуют использования λ-характеристик.

На практике выявление фактических закономерностей изменения надежности часто начинается с построения графиков λ-характеристик на основе статистических данных. Это позволяет потом перейти к определению и других характеристик — *f(t) и P(t),* связанных с $\lambda(t)$. При этом во многих случаях для того, чтобы описать характеристики надежности какими-либо математическими моделями с возможностью их анализа, важно имеющиеся в действительности распределения времени безотказной работы аппроксимировать теоретическими распределениями, различными для каждого периода эксплуатации. Так, период нормальной эксплуатации описывается **экспоненциальным распределением,** играющим в связи с этим важную роль в теории надежности; период безотказной работы при износе — **нормальным распределением, распределением Вейбулла** и др.; период приработки — обычно распределением Вейбулла. Далее эти теоретические распределения будут рассмотрены подробно.

2.1 Порядок решения задач надежности

Надежность изделия обеспечивается на всех этапах его жизненного цикла: от начальной стадии выполнения проектно-конструкторских работ до заключительной стадии эксплуатации. Основным условием полного соответствия авиационного изделия заданным требованиям по надежности является строгое выполнение правила, называемого **триадой надежности:** надежность закладывается при проектировании, обеспечивается в производстве и поддерживается в эксплуатации.

Это значит, что нельзя решить задачу создания высоконадежных изделий путем компенсации недоработок предыдущего этапа на

последующем. Если в процессе проектирования не полностью решены все вопросы создания изделия с заданным уровнем надежности и не заложены конструктивные и схемные решения, обеспечивающие безотказное функционирование всех узлов и систем изделия, то эти недостатки нельзя устранить в процессе производства и их последствия приведут к низкой надежности изделия в эксплуатации. В процессе производства должны быть в полном объеме реализованы все решения, разработки и указания конструктора и строго выполнены заданные технологические операции и испытания. Важное значение в реализации необходимого уровня надежности имеет эксплуатация. В эксплуатации должны выполняться установленные инструкциями условия и правила применения изделия, своевременно приниматься меры по изучению и устранению причины выявляемых неисправностей, анализироваться и обобщаться опыт использования изделия в реальных условиях.

Требования и количественные показатели надежности обычно задаются в техническом задании на разработку конкретного изделия одновременно с функциональными и параметрическими характеристиками. При этом учитываются:

- назначение и особенности применения создаваемого изделия, требования безопасности и технического обслуживания для поддержания его надежности в эксплуатации;

- достигнутый уровень надежности образцов или прототипов изделия,

находящихся в эксплуатации, и фактические количественные показатели надежности комплектующих элементов, узлов и агрегатов. При этом следует учитывать достижения в областях создания новых материалов, технологических процессов и развития методов проектирования;

- внешние условия (температура, давление, влажность, запыленность, загазованность и другие параметры окружающей среды), действующие нагрузки и режимы работы изделия;

- методы и критерии подтверждения заданных показателей надежности (расчет, результаты испытаний, сроки эксплуатации), а также виды и необходимый объем испытаний.

Основным документом, определяющим объем работы по надежности, является комплексная программа обеспечения надежности, разрабатываемая для каждой стадии разработки конкретного вновь создаваемого изделия. Критерием оценки правильности и полноты выполнения этих работ является соответствие уровня надежности изделия и его важнейших частей заданным требованиям, т.е. выданному техническому заданию на разработку, производство и эксплуатацию изделия.

Комплексные программы содержат организационные, технические и методические вопросы, решаемые на всех стадиях разработки изделия, и направлены на решение задач по обеспечению заданного уровня надежности, безопасности и эксплуатационной технологичности и подтверждения этого уровня в эксплуатации.

Высокая эффективность работ по реализации такой программы подтверждена надежностью и безопасностью самолета Ил-86 и сравнительно короткими сроками его создания, испытания и освоения.

Типовая комплексная программа включает в себя перечень следующих конкретных работ, выполняемых на отдельных стадиях:

- анализ и обоснование различных возможных конструктивно-функциональных вариантов схем создаваемого изделия;

- анализ достигнутых уровней надежности имеющихся аналогов или прототипов изделия;

- разработку и обоснование выбранной конструктивной схемы изделия;

- анализ ожидаемых условий эксплуатации, внешних воздействий и рабочих нагрузок;

- распределение требований к уровню надежности составляющих системы комплектующих агрегатов и выдачу заданий их разработчикам;

- полный расчет по подтверждению выполнения заданных требований по надежности;

- расчет и обоснование минимально допустимых уровней безотказности и назначенных уровней ресурса на отдельных этапах доводки и испытания;

- разработку требований к технологии изготовления элементов и частей изделия, их монтажу и контрольно-сдаточным испытаниям;

- анализ работоспособности изделия и отдельных его частей при возможных отказах с оценкой эффективности резервирования;

- оценку работоспособности и эффективности средств контроля, систем сигнализации об отказах и методов диагностики технического состояния;

анализ причин выявляемых отказов, их последствий и подготовку решений по необходимым доработкам;

- оценку фактического уровня безотказности и обоснование назначенного ресурса.

2.2 Основные положения теории вероятностей

2.2.1 Случайные события

При проведении большого числа испытаний, т.е. при многократной реализации одной и той же совокупности условий, обнаруживаются определенные закономерности в наступлении случайных событий. Изучение этих закономерностей и составляет одну из задач теории вероятностей.

Центральным вопросом всей проблемы надежности является изучение отказов как случайных событий. Отказы могут быть также и неслучайными, к которым можно отнести отказы из-за неправильной регулировки, грубых ошибок и просчетов обслуживающего персонала.

Событие, которое при неоднократном воспроизведении одного и того же опыта или испытания в одних и тех же условиях протекает каждый раз несколько по-иному и в различные моменты времени, называется случайным. Это значит, например, что при однотипных испытаниях в одних и тех же

условиях и в течение отделенного периода времени отказ возможен, но, однако, он может возникнуть, а может и не возникнуть.

2.2.2 Случайные величины

Случайные события количественно оцениваются **случайными величинами,** к которым, например, можно отнести:

- продолжительность срока службы t, $t_{ср}$, $t_{рем}$ и т.д. ;

- количество отказов m определенной группы однотипных изделий в течение заданного времени наработки;

- частость появления отказов однотипных изделий m/N, где N — общее число изделий, участвующих в испытании.

Из-за невозможности заранее указать, какое конкретное значение примет случайная величина при данных испытаниях, для ее характеристики введено понятие вероятности.

Вероятность — численная мера объективно существующей возможности появления (или не появления) изучаемого события A и обозначается через $P(A)$.

Классический способ определения вероятности основан на понятии равновозможных событий, являющихся исходами данного испытания и образующих полную группу несовместных событий. Вероятность события численно равна отношению числа случаев, благоприятствующих появлению данного события, к общему числу равновозможных случаев при стремлении общего числа событий к бесконечности.

Вероятностью случайного события называется постоянное число, около которого группируется частность этого события, т.е. отношение числа испытаний, в которых появилось данное событие, к общему числу испытаний.

Из определения следует, что вероятность появления события лежит в пределах от 0 до 1, т.е.

$$0 \le P(A) \le 1$$

Событие, вероятность которого равна 1, называется достоверным событием $P(A) = 1$. Событие, вероятность которого равна 0, называется *невозможным событием* $P(A) = 0$.

Несколько событий образуют **полную группу,** если при каждом испытании обязательно наступит хотя бы одно из них.

На практике полная группа событий всегда бывает группой таких событий, из которых хотя бы два являются несовместными. В этом случае, когда полная группа событий состоит из двух событий, эти два события также называют *противоположными.* Событие, противоположное данному событию A, обозначают $\bar{A}$. Для полной группы событий достаточно иметь два несовместных события A к $\bar{A}$.

В теории вероятности в качестве примера противоположных событий приводится выпадение орла или решки при бросании монеты. Примерами противоположных событий являются отказ и нормальная работа изделия.

2.3 Основные теоремы теории вероятностей

2.3.1 Теорема сложения вероятностей

Авиационный двигатель — это сложное изделие и в нем возможны самые разнообразные виды отказов. Поэтому отказ ГТД должен рассматриваться как сложное событие, определяющееся совокупностью появления отказов его отдельных агрегатов, узлов и систем. Причем отказы этих составных частей двигателя могут быть несовместными и независимыми.

Сложное событие A, заключающееся в том, что произойдет либо событие A_1, либо событие A_2, либо A_h либо A_n называется *суммой исходных событий* и обозначается

$$A = A_1 + A_2 + \ldots + A_i + A_n = \sum_{n=1}^{n} A_i$$

При этом предполагается, что известны исходные вероятности $P(A_i)$ для n несовместных событий A_i (i=1, 2, ... n). Тогда вероятность суммы нескольких несовместных событий равна сумме вероятностей этих событий:

$$P(A) = A_1 + A_2 + ... + A_i + A_n = P(A_1) + P(A_2) + ...P(A_i) + ...P(A_n) = \sum_{i=1}^{n} P(A_i)$$

Если появление хотя бы одного из n несовместных событий является **достоверным** событием, то события A составляют **полную группу** несовместных событий, для которых выполняется нормирующее соотношение

$$P(A_n) = \sum_{i=1}^{n} P(A_i) = 1$$

Отсюда для двух противоположных событий (A и $\bar{A}$):

$$P(A_n) = 1 - P(\bar{A}).$$

В частности, для трех совместных событий

$$P(A) = P(\sum_{i=1}^{n} A_i) = \sum_{i=1}^{n} P(A_i) - \sum_{i<j} (A_i A_j) + \sum_{i<j<k} (A_i A_j A_k) + ... + (-1)^n P(A_1 A_2 ... A_n).$$

2.3.2 Теорема умножения вероятностей

Сложное событие A, заключающееся в одновременном осуществлении нескольких событий, называется *произведением исходных событий* A_i

$$A = A_1 A_2 ... A_i ... A_n = \prod_{i=1}^{n} A_i.$$

Вероятность произведения независимых совместных событий равна произведению вероятностей этих событий:

$$P(A) = P(A_1 A_2 ... A_i ... A_n) = P(A_1)P(A_2)...P(A_i)...P(A_n) = \prod_{i=1}^{n} P(A_i).$$

В частном случае, когда вероятности всех событий равны,

$$P(A_i) = P; \quad P(A) = P^n.$$

Для зависимых событий

$$P(A) = P(A_1) \cdot P(A_2 / A_1) \cdot P(A_3 / A_1 A_2) ... P(A_n / A_1 A_2 ... A_{n-1}),$$

где $P(A_2 / A_1)$, $P(A_3 / A_1 A_2)$, $P(A_n / A_1 A_2 ... A_{n-1})$ — условные вероятности зависимых событий, вычисленные при условии, что произошли все предшествующие события. Если события несовместны, то произведение таких событий является невозможным событием, вероятность которого равна нулю.

2.3.3 Теорема полной вероятности

При решении некоторых практических задач вычисление вероятности появления некоторого события можно существенно облегчить, если связать появление этого события с возникновением единственно возможных и несовместных событий, под которыми понимаются гипотезы о всех возможных исходах испытаний.

Например, необходимо оценить вероятность безотказной работы двигателя в полете, в то же время известно, что отказ двигателя в полете может вызываться отказами различных элементов, узлов и систем двигателя. Известна также степень влияния различных отказов составных частей двигателя на отказ двигателя в целом, например, нарушение газодинамической устойчивости неизбежно приводит к помпажному срыву или самовыключению двигателя; погасание форсажной камеры приводит к значительному снижению тяги, однако двигатель продолжает работать; повреждения системы управления при некоторых обстоятельствах могут привести или к помпажному срыву или невыходу двигателя на заданный режим. Поэтому для облегчения вычисления вероятности отказа $\bar{A}$ (или безотказной работы A) двигателя удобно ввести следующие гипотезы (предположения) о влиянии отдельных отказов составных частей на отказ двигателя в целом: H_1—нарушение газодинамической устойчивости; H_2 —

погасание форсажной камеры; H_3— повреждение системы управления; H_4 — нарушение смазки и т.д.

Для решения поставленной задачи, т.е. определения вероятности отказа двигателя при появлении того или иного события, нет надобности в проведении испытаний с доведением двигателя до отказа (помпажа или самовыключения), а достаточно определить из ряда частных или поэлементных испытаний вероятность появления каждого в отдельности из рассматриваемых отказов элементов или узлов. Дальше можно решать задачу определения условной вероятности отказа двигателя при появлении рассматриваемых отказов, т.е. при осуществлении выбранных гипотез.

Таким образом, необходимо определить условные вероятности отказа двигателя при нарушениях газодинамической устойчивости $P(A/H_1)$, при погасании форсажной камеры $P(A/H_2)$, при повреждении системы управления $P(A/H_3)$ и т.п. Зная вероятности гипотез $P(H_i)$ и условные вероятности появления события A при осуществлении этих гипотез $P(A/H_i)$, можно определить вероятность отказа (или безотказной работы) двигателя. Для этой цели используется формула полной вероятности.

Условия, при которых применяется эта формула:

1) некоторое интересующее нас событие A может наступить или не наступить с одним из ряда несовместных событий составляющих полную группу событий. События такого ряда называют *гипотезами.*

$$H_1, H_2, \ldots H_i, \ldots H_n,$$

Вероятности этих гипотез известны, т.е. даны

$$P(H_1), P(H_2), \ldots P(H_i) \ldots P(H_n).$$

Так как имеем полную группу событий, получаем

$$\sum_{i=1}^{n} P(H_i) = 1;$$

2) известны условные вероятности появления события A при осуществлении каждой из указанных гипотез, т.е. даны

$$P(A/H_1),\ P(A/H_2) \ldots\ P(A/H_i) \ldots\ P(A/H_n).$$

Требуется найти вероятность события A.

Событие A может осуществиться, если произойдет одно из следующих возможных событий:

- осуществится гипотеза H_1 (с вероятностью $P(H_1)$), тогда вероятность зависимого от этой гипотезы события A будет равна $P(A/H_1)$;

- осуществится гипотеза H_2 с вероятностью $P(H_2)$, и тогда вероятность события A будет равна $P(A_1H_2)$

- осуществятся гипотезы $H_i, \ldots H_n$, и соответственно $P(A/H_i) \ldots P(A/H_n)$.

Полная искомая вероятность события A определится по следующей формуле полной вероятности:

$$P(A) = \sum_{i=1}^{n} [\mathrm{P(H_i)P(A/H_i)}].$$

Итак, полная вероятность события равна сумме парных произведений вероятностей каждой из гипотез на отвечающие им условные вероятности появления этого события.

При определении полной вероятности необходимо следить за тем, чтобы полностью были учтены все гипотезы, при которых может наступить рассматриваемое явление. Свидетельством полного учета всех условий является выполнение равенства

$$\sum_{i=1}^{n} P(H_i) = 1.$$

Кроме того, необходимо обращать внимание на то, чтобы гипотезы H_1, $H_2, \ldots H_3, \ldots H_n$, были несовместными.

2.3.4 Теория гипотез (формула Байеса)

При проведении испытаний можно определить фактическую вероятность появления события A в зависимости от той или иной гипотезы. Тогда по теореме Байеса можно определить, какие вероятности имеют гипотезы с учетом полученных результатов испытаний, при условии появления события A, т.е. определить $P(H_i/A)$.

$$P(H_i / A) = \frac{P(H_i) \cdot P(A / H_i)}{\sum_{i=1}^{n} P(H_i) \cdot P(A / H_i)}.$$

Итак, *теорема Байеса* гласит: вероятность гипотезы после испытания равна произведению вероятности гипотезы до испытания на соответствующую ей условную вероятность события, которое произошло при испытании, деленному на полную вероятность этого события.

При этом сумма вероятностей гипотез как до, так и после испытаний должна быть равна единице, т.е.

$$\sum_{i=1}^{n} P(H_i / A) = 1.$$

2.4 Характеристики случайных величин

2.4.1 Закон распределения вероятностей случайной величины

Все случайные величины имеют одну общую характерную особенность: все они являются такими переменными величинами, которые в зависимости от случайного хода испытаний могут принимать то или иное (но только одно) возможное свое значение, которое заранее до проведения испытаний предсказать невозможно. Знание возможных значений случайной величины еще не позволяет полностью описать эту случайную величину. Весьма важно знать, как часто следует ожидать появления тех или иных возможных значений в результате повторения испытания в одних и тех же условиях. Для этого необходимо знать закон распределения случайной величины.

Прежде чем перейти к законам распределения случайных величин, рассмотрим такие характеристики распределения вероятностей случайных

величин, как функция распределения случайной величины и плотность распределения вероятности случайной величины.

Для рассмотрения этих функций воспользуемся в качестве примера случайной дискретной величиной, число возможных значений которой конечно. Пусть имеется случайная дискретная величина X, которая может принимать значения X_1, X_2, ... X_n. В результате испытаний случайная величина X примет какое-то одно из этих возможных значений, т.е. произойдет какое-то одно из следующих событий:

$$X = X_1,\ X=X_2,\ \ldots,\ X=X_n.$$

Все эти события образуют полную группу несовместных событий. Если вероятности появления каждого из событий обозначить:

при $X = X_1$ через $P(X = X_1) = P_1$

$X = X_2 \quad P(X=X_2) = P_2;$

... ...

$X = X_i \quad P(X=X_i) = P_i;$

... ...

$X = X_i \quad P(X=X_n) = P_n,$

то сумма вероятностей всех возможных значений дискретной случайной величины равна единице:

$$\sum_{i=1}^{n} P(X = x_1) = 1.$$

2.4.2 Функция распределения

Функцией распределения случайной величины X называется функция аргумента x_i, равная вероятности того, что эта случайная величина X примет любое значение, меньшее, чем x.

Возьмем случайную величину X, выберем на числовой оси точку с координатой x и рассмотрим вероятность события $X < x$, т.е. $P(X< x)$.

Очевидно, указанная вероятность $P(X< x)$ является функцией x, и обозначается она через $F(X) = P(X < x)$.

Если X — случайная дискретная величина, то на основании правила сложения вероятностей несовместных событий ее функция распределения будет иметь вид

Неравенство $x_i < X$ означает, что суммирование распространяется на все те возможные значения случайной величины, которые по своей величине меньше выбранного аргумента x. Функция распределения дискретной величины **разрывна** и возрастает скачками при переходе возможных значений дискретной случайной величины. Совокупность вероятностей всего ряда значений данной дискретной величины выражается в виде ступенчатой функции распределения вероятностей.

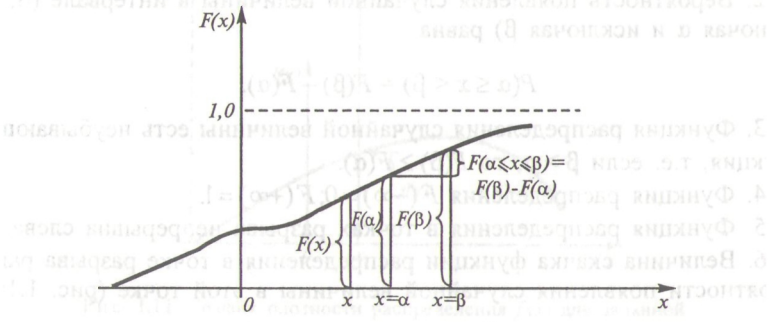


Рисунок 2.4 - Функция распределения непрерывной случайной величины

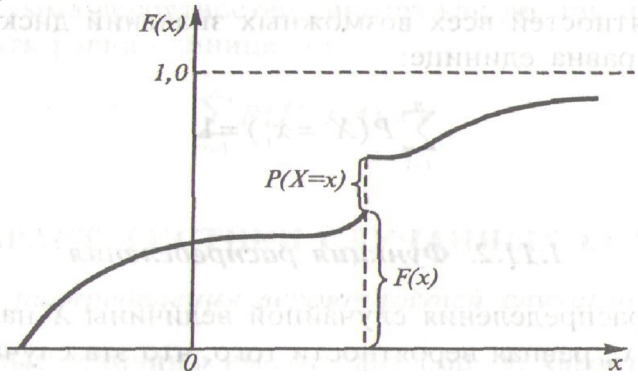


Рисунок 2.5 - Точка разрыва функции распределения

Если представить, что число n возможных значений дискретной случайной величины бесконечно возрастает, а промежутки между ними становятся все меньше и меньше, то в пределе можно получить гладкую непрерывную кривую $F(x)$ (рис. 2.4).

Если рассматривать промежуток между случайными величинами, стремящимися к 0, то вероятность попадания любого конкретного возможного значения **непрерывной** случайной величины в нулевом промежутке также становится равной 0. В этом состоит сущность непрерывной случайной величины.

2.4.3 Основные свойства функции распределения

1. Функция распределения есть неотрицательная функция, заключенная между 0 и 1:

$$0<F(x)<1.$$

2. Вероятность появления случайной величины в интервале (α,β), (включая α и исключая β) равна

$$P(\alpha \le x < \beta) = F(\beta) - F(\alpha).$$

3. Функция распределения случайной величины есть неубывающая функция, т.е. если $\beta > \alpha$, то $F(\beta) \ge F(\alpha)$.

4. Функция распределения $F(-\infty) = 0; F(+\infty) = 1..$

5. Функция распределения в точках разрыва непрерывна слева.

6. Величина скачка функции распределения в точке разрыва равна вероятности появления случайной величины в этой точке (рис. 2.5)

$$P(X = x) = F(x + 0) - F(x).$$

2.4.4 Плотность распределения

Функция распределения непрерывной случайной величины является ее исчерпывающей вероятностной характеристикой. Но она имеет недостаток:

по ней трудно судить о характере распределения случайной величины в небольшой окрестности той или иной точки на числовой оси. Поэтому вводится особая функция, называемая *плотностью распределения вероятности* или плотностью распределения, которую находят путем дифференцирования функции распределения непрерывной случайной величины *F(x)*. Для дискретной случайной величины функция плотности распределения не существует.

Предел отношения вероятности попадания непрерывной случайной величины на элементарный участок от x_i, до $x_i+\Delta x$ к длине этого участка Δx, когда Δx стремится к нулю (рис. 2.6), называется плотностью распределения случайной величины в точке x_i:

$$f(x)=\lim_{\Delta x\to 0}\frac{P(x<X<x+\Delta x)}{\Delta x}=\lim_{\Delta x\to 0}\frac{\Delta F(x)}{\Delta x}.$$

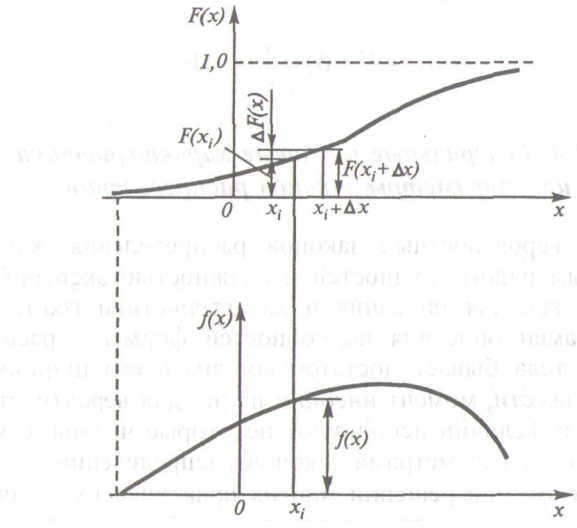


Рисунок 2.6 - График плотности распределения *f(x)* для заданной функции распределения *F(x)*

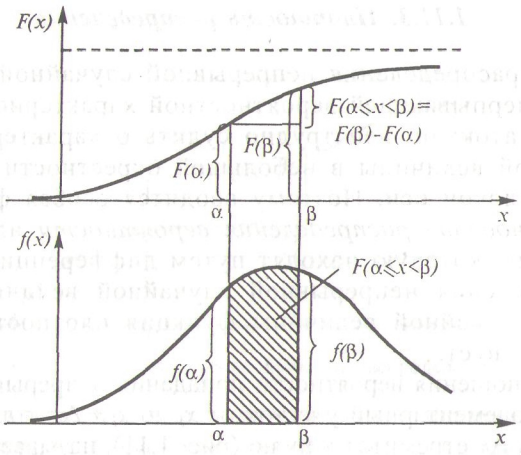


Рисунок 2.7 - График вероятности попадания случайной величины на участок $\alpha - \beta$

Таким образом, плотность распределения *f(x)* указывает на то, как часто появляется случайная величина в малой окрестности *x* при повторении испытаний.

Вероятность попадания непрерывной случайной величины на участок (α, β) равна интегралу от плотности распределения, взятого по этому участку (рис. 2.7),

$$P(\alpha \le x < \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f(x)dx.$$

2.4.5 Генеральные числовые характеристики или параметры законов распределения

Получение вероятностных законов распределения, как правило, связано с целым рядом трудностей и сложностью эксперимента. Поэтому так же, как для описания и характеристики геометрического тела, когда взамен описания подробностей формы и распределения масс твердого тела бывает достаточным знать его ширину, высоту, длину, центр тяжести, момент инерции и т.п., для вероятностного описания случайных величин используют некоторые числовые характеристики, являющиеся параметрами законов распределения.

Таким образом, при решении многих практических задач можно и не знать точные законы распределения случайных величин, а достаточно лишь знать числовые характеристики этих величин, определение которых осуществляется гораздо проще.

Основными числовыми характеристиками случайных величин, используемыми в теории надежности, являются:

- математическое ожидание или среднее значение *[M(x)];*

- дисперсия или среднеквадратическое отклонение *[D(x)]* или σ^2;

- коэффициент вариации *v(x);*

- мода *Мо* и медиана *Мд;*

- моменты различных порядков (начальные и центральные), частными случаями которых являются математическое ожидание и дисперсия.

2.4.6 Математическое ожидание

Математическим ожиданием или средним значением случайной величины называется постоянное число, около которого с ростом числа испытаний устойчиво колеблется среднее арифметическое значение случайной величины, найденное по опытным данным (механическая интерпретация — абсцисса центра тяжести системы материальных точек).

Для произвольной случайной величины с функцией распределения *F(x)* математическое ожидание определяется как интеграл

$$m_x = M[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x dF(x).$$

В том случае, когда *X*— дискретная случайная величина, предыдущее выражение сводится к виду

$$m_x = \sum_{i=1}^{n} x_i P(X = x_i) = \sum_{i=1}^{n} [x_i P_i].$$

Таким образом, математическое ожидание дискретной случайной величины (например, числа отказов) равно сумме парных произведений всех возможных значений этой величины на вероятность этих значений.

Если X — непрерывная случайная величина, то $dF(x)=f(x)dx$ и тогда математическое ожидание определяется интегралом

$$m_x = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx.$$

При определении математического ожидания, например, такой непрерывной случайной величины, как время наработки до отказа (которое существует только в интервале $(0, \infty)$), последний интеграл имеет вид:

$$m_t = M[t] = \int_{0}^{\infty} tf(t)dt.$$

2.4.7 Дисперсия случайной величины

Дисперсия случайной величины — это математическое ожидание квадрата отклонения случайной величины от ее математического ожидания. Если математическое ожидание есть центр рассеивания, то дисперсия характеризует степень или рассеивание случайной величины X около ее центра рассеивания:

$$D[X]=M[(x-m_x)^2].$$

Дисперсия всегда больше 0 и вычисляется как интеграл

$$D[X]= \int_{-\infty}^{\infty} (x-m_x)^2 dF(x).$$

Для дискретной величины дисперсия вычисляется как сумма

$$D[X] = \sum_{i=1}^{n} (x_i - m_x)^2 P(X = x_i) = \sum_{i=1}^{n} (x_i - m_x)^2 P_i.$$

Для непрерывной случайной величины дисперсия вычисляется при помощи интеграла

$$D[X]=\int_{-\infty}^{\infty}(x-m_x)^2 f(x)dx. \ .$$

Дисперсия измеряется квадратом единицы измерения случайной величины. Для большего удобства вместо дисперсии используют только ее положительный квадратный корень. Эта величина называется средним квадратичным отклонением и обозначается буквой σ с индексом случайной величины. Для случайной величины X имеем

$$\sigma(x)=\sqrt{D[X]}.$$

Рассеивание в относительных единицах (в процентах) выражается коэффициентом вариации

$$v(x)=\frac{\sigma(x)}{M(x)}.$$

Коэффициент вариации может иметь любые положительные или отрицательные значения. Например, при $M(x) = 0$ $v(x) = \infty$.

2.4.8 Мода и медиана случайной величины

Модой Mo дискретной случайной величины называется наиболее вероятное ее значение. Для непрерывной случайной величины мода есть такое значение случайной величины, которому отвечает наибольшее значение плотности распределения, т.е. $f(Mo)$=max.

Распределение может быть двухмодальным или многомодальным, а также антимодальным.

Медианой $M_д$ случайной величины X называется такое ее возможное значение, относительно которого равновероятно получение большего или меньшего значения случайной величины, т.е.

$$P(x>Mд) = P(x<Mд).$$

Это равенство означает, что медиана — это абсцисса точки, в которой площадь, ограниченная кривой распределения, делится пополам. Так как вся

площадь, ограниченная кривой, равна единице, то, очевидно, функции распределения в точке $M_д$

$$F(Mд) = P(x<Mд) = 0,5.$$

Если распределение одномодальное и симметричное, то все три характеристики — математическое ожидание, мода и медиана — совпадают.

3. ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ

Законы распределения отказов, являющихся случайными величинами, имеют большое значение для теории и практики работ по обеспечению надежности изделий. Знание этих законов позволяет рассчитывать и прогнозировать надежность изделий на этапах их проектирования и испытаний; особенно большое значение эти законы имеют при оценке правильности установления и продления ресурса изделий.

Наибольшее значение для надежности имеют законы: биномиальный и Пуассона — для дискретных величин; экспоненциальный, Вейбулла и нормальный — для непрерывных величин. Кроме того, используются два вспомогательных закона — хи-квадрат и гамма-распределения. Для сложных и многофункциональных распределений применяются композиции указанных законов распределения и усеченные законы распределения.

3.1 Биномиальное распределение

Это распределение может быть получено, если в качестве случайной величины взять число отказов, возникающих в процессе проведения однотипных независимых испытаний выборки изделий в одинаковых условиях, т.е. когда равновероятно появление отказов в любом из проводимых испытаний.

Если q — вероятность появления отказа единичного изделия (q = const), n — число испытаний (изделий), m — возможное число отказов при n испытаний (отказ m изделий), то вероятность $q_{m,n}$ появления отказа m изделий из n числа испытаний, т.е. вероятность рассматриваемой случайной величины X определится по формуле Бернулли:

$$P(X = x) = q_{m,n} = C_n^m \cdot q^m (1-q)^{n-m},$$

где m = 0, 1, 2, ... n, а C_n^m — число всех возможных сочетаний, которое можно образовать из n испытаний, собирая в каждом из них по m отказов

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}.$$

Практическое применение биномиального закона:

- статистический контроль качества выборки изделия, составляющий не более 10% объема партии;

- определение количества отказов неремонтируемых изделий в течение заданного времени при их испытаниях.

При очень малых значениях g < 0,1 биномиальное распределение может быть заменено **распределением Пуассона,** а при больших значениях $nq > 20$ — **нормальным распределением.**

3.2 Распределение Пуассона

Распределение Пуассона, или закон редких явлений, так же, как и биномиальное распределение, распространяется на те случаи, когда случайная величина принимает целые и положительные значения.

Физический смысл распределения Пуассона такой же, как и биномиального, т.е. оно определяет вероятность появления в малых выборках различных значений случайной величины *m*. Эта вероятность находится по формуле

$$P(X = x) = q_{m,n} = \frac{a^m}{m!}e^{-a}.$$

Распределение Пуассона можно использовать двояко:

- как заменитель биномиального распределения. В этом случае $a = qn$, где n — число испытуемых изделий (количество изделий в выборке); q — вероятность появления отказа единичного изделия;

- при выполнении расчетов по надежности и при испытаниях ремонтируемых изделий, для которых распределение Пуассона имеет самостоятельное значение. В частности для ремонтируемого изделия при установившемся режиме работы случайное число отказов в единичном изделии распределено по закону Пуассона. В этом случае $a = M$, т.е. равно

математическому ожиданию, т.е. среднему числу отказов, приходящемуся на одно изделие при проведении испытаний:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i}{n},$$

где m_i, — число отказов, которое было определено в i-м опыте; n — число опытов.

Правильность предположения о наличии распределения Пуассона подтверждается опытным путем: найденные из опыта статистические характеристики $\hat{M}(x)$ и $\hat{D}(x)$ должны быть равны между собой.

Если $m = 0$, то распределение Пуассона трансформируется в экспоненциальное распределение.

3.3 Экспоненциальное распределение

Экспоненциальный закон — один из основных законов распределения длительности срока службы технических устройств. В качестве основного параметра экспоненциального распределения является $\lambda(t)$, которым характеризуется интенсивность отказов для неремонтируемых, и параметр потока отказов $\omega(t)$ — для ремонтируемых изделий при их работе на установившихся режимах (для внезапных отказов, не связанных с износом или старением элементов изделия). Для неремонтируемых изделий $\lambda(t)$ показывает, какая доля работающих в момент времени t изделий выходит из строя в единицу времени после момента t.

Если в выражении для вероятности безотказной работы ($P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$) положить $\lambda(t) = \lambda$ =const, где t — наработка до отказа (или между отказами), что соответствует периоду нормальной эксплуатации, то получим (рис. 3.1)

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

а учитывая ($f(t) = P(t) \cdot \lambda(t)$), имеем плотность распределения длительности срока службы

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}.$$

Из выражений ($P(t) + Q(t) = 1$) и ($P(e) = e^{-\lambda t},$) следует, что вероятность отказа (или функция экспоненциального распределения) равна

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}.$$

Учитывая выражение ($\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt}$) и λ =const, имеем $-\frac{dp(t)/dt}{P(t)}$=const, что соответствует условию постоянства относительной скорости уменьшения по времени величины вероятности безотказной работы.

Поскольку среднее время наработки до отказа $T_{ср}$ в соответствии с выражением ($\mathrm{T_{ср}} = \int_0^\infty e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$) $T_{ср}$=1/λ , то можем записать (см. ($P(t) = e^{-\lambda t},$)) :

$$P(t) = e^{-t/T_{\text{ср}}} \ \textit{и} \ Q(t) = 1 - e^{-t/T_{\text{ср}}}$$

Так как $T_{ср}$ «1, имеем

$$e^{-x} \cong 1 - x; \ \ P(t) = 1 - t/T_{\text{ср}}; \ \ Q(t) = t/\mathrm{T_{ср}}$$

где t — время полета.

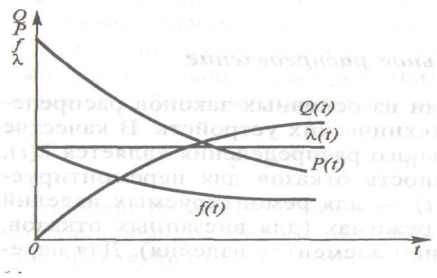


Рисунок 3.1 - Графики экспоненциального распределения, содержащие зависимости от времени наработки основных характеристик надежности

Следовательно, при экспоненциальном законе надежности достаточно знать среднюю наработку до отказа, чтобы определить вероятность безотказной работы в любой момент времени. Напомним, что

экспоненциальный закон надежности описывает надежность только при условии внезапного характера отказов, не связанного с предыдущей работой изделий.

На практике часто бывает так, что экспоненциальный закон не имеет места ($\lambda \neq$ const), но, однако и в этом случае его можно применять для ограниченных отрезков времени. Это допущение оправдывается тем, что при ограниченном периоде времени переменную интенсивность отказов без большой ошибки можно заменить средним значением $\lambda_{ср}$, т.е. $\lambda(t) \sim \lambda_{\text{ср}}(t)$.

3.4 Распределение Вейбулла

Двухпараметрическое распределение Вейбулла является более гибким, чем экспоненциальное, которое может рассматриваться как частный случай первого. Это распределение получено эмпирически.

Плотность распределения Вейбулла

$$f(t) = \frac{m}{t_o} t^{m-1} e^{-t^m / t_o}.$$

При $1/t_o = \lambda$ и $m=1$ уравнение $\left(f(t) = \frac{m}{t_o} t^{m-1} e^{-t^m / t_o}\right)$ превращается в $(f(t) = \lambda e^{-\lambda t})$ для плотности вероятностей экспоненциального распределения. Величина m — переменный параметр, имеющий разные значения и подбирается в результате обработки экспериментальных данных. При описании участка приработки $m < 1$, участка износа — $m > 1$, участка нормальной эксплуатации $m = 1$; t_0 — параметр, связанный со средней наработкой до отказа $T_{ср}$ уравнением

$$t_o = \left(\frac{T_{\text{ср}}}{\text{b}_\text{m}}\right)^m \text{ и } \text{b}_\text{m} = \Gamma\left(1 + \frac{1}{\text{m}}\right) = \int_0^\infty u^{1/m} e^{-u} du - \text{гамма функция.}$$

Интегрируя выражение $\left(f(t) = \frac{m}{t_o} t^{m-1} e^{-t^m / t_o}\right)$ от 0 до 1, получаем функцию распределения $F(t) = Q(t)$

$$Q(t) = 1 - e^{-t^m / t_o}.$$

Следовательно,

$$P(t) = e^{-t^m / t_o};$$

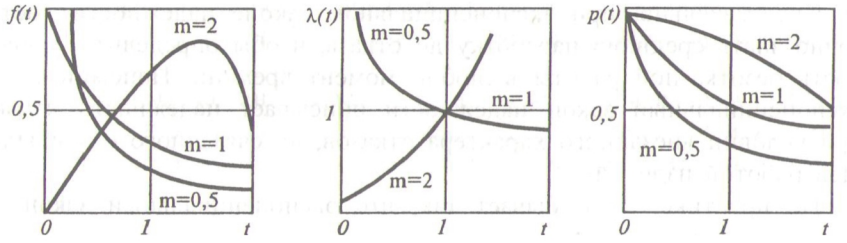


Рисунок 3.2 - Графики распределения Вейбулла для различных значений параметра m

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{m}{t_o} t^{m-1}.$$

Средняя наработка до отказа

$$T_{\text{ср}} = \int_0^\infty e^{-t^m / t_o} dt = t_o^{1/m} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\text{m}}\right).$$

3.5 Нормальное (гауссово) распределение

Главная особенность нормального распределения состоит в том, что оно является предельным распределением, к которому приближаются другие законы распределения. Можно показать, что сумма большого числа независимых случайных величин, подчиненных каким угодно законам распределения, приближенно подчиняется нормальному закону распределения. При этом основное ограничение состоит в том, чтобы все величины в общей сумме имели относительно малое значение.

В отличие от экспоненциального и распределения Вейбулла, которые применимы только для положительных непрерывных случайных величин, нормальное распределение применимо для непрерывных случайных величин, которые могут принимать любые значения $-\infty$ до $+\infty$

Плотность нормального распределения определяется формулой

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}}.$$

Графики изменения плотности нормального распределения приведены на рис. 3.3. В частном случае, когда $m_x = 0$ и $\sigma_x = 1$ имеем

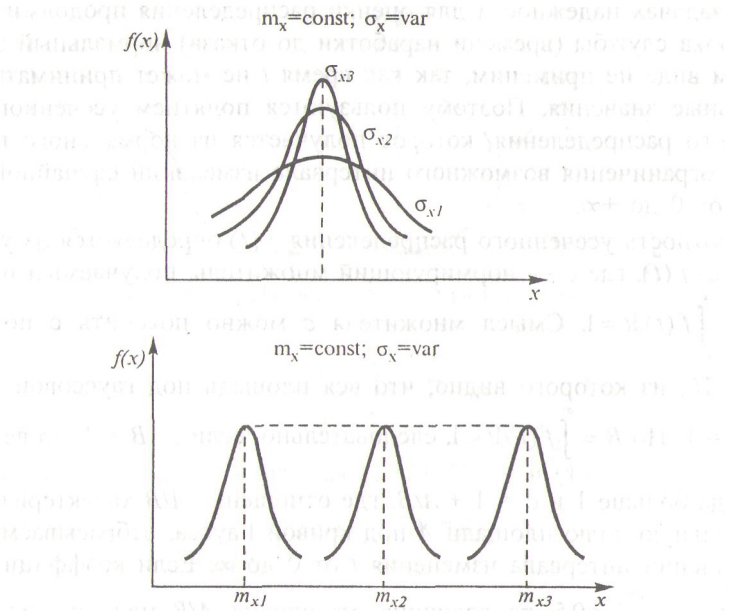


Рисунок 3.3 - Графики изменения плотности нормального распределения

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}},$$

и при

x=1 f/(x) = 0,3989,

x = 2 f/(x) = 0,2420,

x = 3 f/(x) = 0,0540,

x = 4 f/(x) = 0,0044,

x=5 f/(x) = 0,0001.

Таким образом, при x > 3σ величина f(x) имеет очень малые значения II поэтому при анализе характеристик распределения часто ограничиваются приближенными значениями f(x) только до x = 3σ (правило трех сигм).

Функция распределения $F(x) = Q(x)$ определяется через плотность распределения

$$F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(x)dx = \frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}} dx.$$

В задачах надежности для оценки распределения продолжительности срока службы (времени наработки до отказа) нормальный закон в чистом виде не применим, так как время t не может принимать отрицательные значения. Поэтому пользуются понятием усеченного нормального распределения, которое получается из нормального при условии ограничения возможного интервала изменений случайной величины от 0 до $+\infty$.

Плотность усеченного распределения $\bar{f}(t)$ определяется из условия $f(t) = c \cdot f(t)$, где c — нормирующий множитель, получаемый из условия $c \cdot \int_0^{\infty} f(t)dt = 1$. Смысл множителя c можно пояснить с помощью рис. 3.4, из которого видно, что вся площадь под гауссовой кривой $A + B = 1$. Но $B = \int_0^{\infty} f(t)dt < 1$, следовательно, если $c \cdot B = 1$, то величина c всегда больше 1 и c=1 + A/B, где отношение A/B характеризует относительную долю площади A под кривой Гаусса, отбрасываемой при ограничении интервала изменения t от 0 до ∞. Если коэффициент вариации $v_t = \frac{\sigma_t}{m_t} < 0{,}5$, то величина отношения A/B мала и $c \approx 1$. Тогда можно считать, что $f(t) \approx f(t)$ достаточной для практических расчетов точностью и пользоваться неусеченным нормальным распределением для описания распределения времени безотказной работы. В практических задачах надежности ГТД коэффициент вариации значительно меньше 0,5 и поэтому можно считать $c \approx 1$.

Вероятность отказа *Q(t)* в случае $c \approx 1$ равна площади под кривой Гаусса, лежащей левее *t* (см. рис. 3.4) и определяется по формуле ($F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(x)dx = \frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}} dx$), в которой величина *x* заменяется на время *t*. Соответственно вероятность безотказной работы, $P(t) = \frac{1}{\sigma_t\sqrt{2\pi}} \int_{t}^{\infty} e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}} dt$,

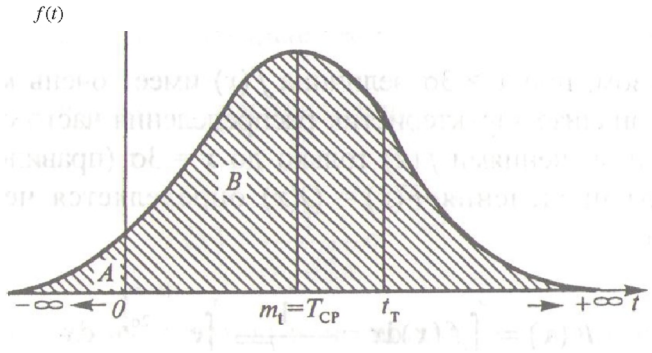


Рисунок 3.4 - График к понятию об усеченном нормальном распределении

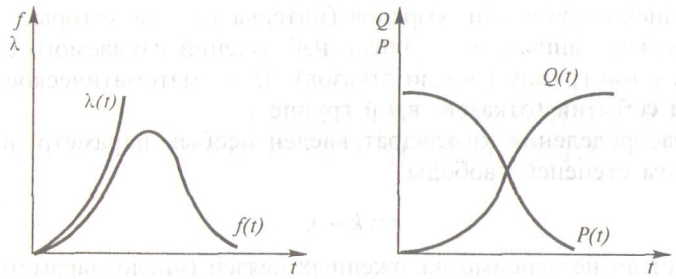


Рисунок 3.5 - График к понятию об усеченном нормальном распределении

а интенсивность отказов, учитывая ($f(t) = P(t) \cdot \lambda(t)$), ($f(x) = \frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}}$.) и ($P(t) = \frac{1}{\sigma_t\sqrt{2\pi}} \int_{t}^{\infty} e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}} dt,$), $\lambda(t) = e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}} \Big/ \int_{t}^{\infty} e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}} dt$

Интегралы в уравнениях $F(x)=\int_{-\infty}^{x} f(x)dx=\frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}}dx$,

$P(t)=\frac{1}{\sigma_t\sqrt{2\pi}}\int_{t}^{\infty} e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}}dt$, $\lambda(t)=e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}}\Big/\int_{t}^{\infty} e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}}dt$ в конечном виде не берутся. Они вычисляются с помощью табулированной функции вида

$$F_o(k)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{k} e^{-\frac{k^2}{2}}dk,$$

где $k=\frac{t-m_t}{\sigma}$, для которой составлены таблицы. Учитывая равенство $F_o(k)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{k} e^{-\frac{k^2}{2}}dk$, выражение $F(x)=\int_{-\infty}^{x} f(x)dx=\frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}}dx$ (при $x=t$) можно записать

$$Q(t)=F_o[(t-m_t)/\sigma_t]$$

Графики нормального распределения показаны на рис. 3.4.

3.6 Распределение хи-квадрат

Данное распределение используется для оценки согласованности теоретического и экспериментального распределений. Критерий согласия χ^2 (критерий «хи-квадрат») обычно записывается так

$$\chi^2=\sum_{i=1}^{k}\frac{(m_i-M_i)^2}{M_i},$$

где $к$ — число групп или разрядов (интервалов), на которые разбиты статистические данные; m_i — число наблюдений изучаемого события, попавших в i-ю группу (число отказов); M_i — математическое ожидание числа событий (отказов) в i-й группе.

Для распределения хи-квадрат введен особый параметр, называемый числом степеней свободы:

$$r = k\text{-}s,$$

где s — число независимо наложенных связей (число параметров) закона распределения.

Для распределения хи-квадрат составлены специальные таблицы

4. МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Существует два метода обеспечения надёжности:

1. Метод физического обеспечения
2. Метод схемного обеспечения

Метод физического обеспечения надежности базируется на изучении физических явлений и причин отказов в зависимости от нагрузок механических и физико-химических свойств материала деталей и от изменения этих параметров во времени. Сущность метода заключается в том, что все элементы изучаемого объекта составляют единую функциональную последовательность и при отказе одного из элементов работоспособность всего изделия нарушается.

$$P_{\Sigma}(t) = \prod_{i=1}^{n} P_i(t)$$

Пусть:

$$P_1(t) = P_2(t) = P_3(t) = 0.9 =>$$
$$P_{\Sigma} = 0.9 \cdot 0.9 \cdot 0.9 = 0.729$$
$$P_{\Sigma} = 0.97 \cdot 0.97 \cdot 0.97 = 0.91$$

Иногда столь высокий уровень надежности (0,97) каждого из элементов может быть либо не достижим, либо на это требуются огромные средства. В этом случае прибегают ко второму методу схемного обеспечения надежности, суть которого следующая: в конструкцию изделия вводят несколько параллельно действующих одинаковых элементов, надежность каждого из которых не очень велика.

4.1 Формулы в теории надежности

1. Последовательное соединение

Вероятность безотказной работы:

$$P_{посл} = P(A_1, A_2, \ldots, A_n) = \prod_{i=1}^{n} P(A_i)$$

Вероятность отказа

- для двух последовательно соединенных элементов:

$$Q = Q(A_1) + Q(A_2) - Q(A_1) \cdot Q(A_2)$$

- для трех последовательно соединенных элементов:

$$Q = Q(A_1) + Q(A_2) + Q(A_3) - Q(A_1) \cdot Q(A_2) - Q(A_1) \cdot Q(A_3) - Q(A_2) \cdot Q(A_3) + \\ + Q(A_1) \cdot Q(A_2) \cdot Q(A_3)$$

2. Параллельное соединение

Вероятность безотказной работы

- для двух элементов

$$P = P(A_1) + P(A_2) + P(A_1) \cdot P(A_2)$$

- для трех элементов

$$P = P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) - P(A_1) \cdot P(A_2) - P(A_2) \cdot P(A_3) - \\ - P(A_1) \cdot P(A_3) + P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot P(A_3)$$

- вероятность отказа

$$Q_{над} = Q(A_i) = \prod_{i=1}^{n} Q(A_i)$$

4.2 Инженерно – физические показатели надежности

При проектировании и доводке двигателя из-за отсутствия статистических данных оценка надежности базируется на инженерно-физических показателях. Правила их выбора должны гарантировать требуемый уровень надежности. Для этих показателей характерны следующие группы оценок:

- статистическая прочность элементов;
- вибрационное состояние деталей и узлов;
- тепловое состояние;
- устойчивая работа всех систем и двигателя на земле и в полете;
- проверка длительными испытаниями.

Количественные показатели надежности:

- коэффициент запаса прочности при работе деталей на наиболее напряженных режимах;

- ползучесть лопаток и дисков;

- уровни вибростойкости деталей агрегатов, запасы по автоколебаниям;

- уровни температур и равномерность температурных полей;

- стабильность статических и динамических характеристик.

Пример:

4.3 Инженерно – физические показатели качества и надежности компрессора ГТД

1. Показатели надежности:

Показатели безотказности:

- Наработка на неисправность на земле и в межрегламентный период;

- Наработка на отказ в полете;

- Наработка на отказ, приводящая к досрочному съему;

Показатели долговечности:

- Ресурс до первого капитального ремонта;

- Наработка основных элементов не менее трех ресурсов;

Прочностные показатели

- Запасы статической прочности рабочих лопаток;

- То же для НА;

- Запасы статической и динамической прочности дисков;

- Запасы по переменным напряжениям рабочих лопаток и НА;

- Расчетные статистические напряжения от газовых сил в РЛ и НЛ;

- Толщина упрочненного слоя в лопатках;

- Максимально допустимая пластическая деформация дисков с учетом превышения наиболее допустимых оборотов ротора на 5%.

2. Показатели безопасности:

- Показатель сопротивления эксплуатационным повреждениям;

- Сохранение работоспособности и параметров при содержании воды в воздухе до 50г/м^3;

- Сохранение работоспособности при попадании в компрессор посторонних частиц (град и птицы);

- Показатели сопротивления критическим ситуациям;

- Непробиваемость корпуса лопатки.

4.4 Обеспечение надежности при проектировании

При проектировании рекомендуется выдерживать следующие мероприятия:

- Тщательное изучение причин отказов;

- Оценка надежности вновь созданного двигателя путем сопоставления с предыдущими изделиями по условиям работы, по свойствам материалов, по технологии изготовления (метод эквивалентного двигателя);

- Упрощение схемы конструкции, сокращение числа последовательно соединенных элементов;

- Агрегатирование – объединение элементов конструкции, выполняющих замкнутый комплекс функций, в единый легкосъемный и легко ремонтируемый агрегат (блочно-модульная конструкция);

- Унификация и стандартизация позволяют использовать во многих изделиях одинаковой надежности узлы и агрегаты;

- Резервирование определенных систем (схемные методы обеспечения надежности);

- Ограничения последствий отказов (непробиваемые кожухи);

- Введение неразрушающих проверок;

- Выделение в конструкторской документации параметров, определяющих надежность.

4.5 Выделения требований КД по обеспечению надежности

Многие эксплуатационные свойства деталей обеспечиваются в КД ее геометрическими параметрами, физико-химическими свойствами материала, параметрами качества поверхностного слоя, а также рядом других требований, которые предъявляются к узлу и агрегату при сборке. Именно эти требования являются определяющими и выполнение их на этапе

изготовления являются обязательными. Зачастую требуется предъявлять особые технологии и особое отношение к выполнению операций, которые исключают даже возможность образования того или иного дефекта. Данные требования относятся к наиболее ответственным деталям и называются КЭПОН (конструктивные элементы и параметры, определяющие надежность) – 0,5…0,7% всех требований к двигателю.

Пример: выделение КЭПОНов на примере болта (рис 4.1)

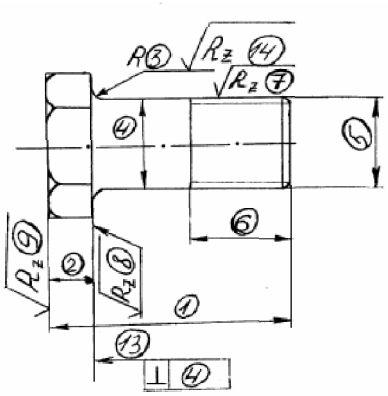


Рисунок 4.1 - Болт

$D_{вн} = 5'$

$D_{н} = 5''$

Материал:

$\sigma_{в} = 10$

$\sigma_{0,2} = 11$

$HRC_{э} = 12$

Для того чтобы назначить КЭПОН, необходимо выяснить условия работы детали и какими эксплуатационными характеристиками она должна обладать.

Пример 1:

Деталь вращается относительно болта и передает нагрузку (рис. 4.2).

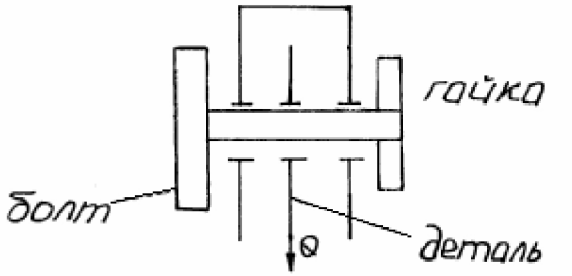


Рисунок 4.2 – Схема работы болта в узле

Требования к болту:

- обеспечение необходимой износостойкости;

- обеспечение прочности на срез.

1) Износостойкость определяется зазором, шероховатостью и твердостью материала: 4, 7, 12;

2) Прочность на срез определяется прочностью сечения болта и пределом прочности материала $\sigma_в$: 4, 10;

4, 7, 10, 12 – КЭПОН

Пример 2:

Соединение трубопроводов (рис. 4.3).

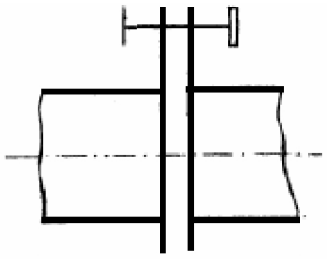


Рисунок 4.3 – Схема соединения трубопроводов

Требования:

- Прочность на растяжение в стыке;

- Усталостная прочность при пульсирующей нагрузке.

1) Прочность на растяжение зависит от площади контакта по резьбе, от самого малого сечения болта, от предела прочности материала и от контакта головки болта с фланцем 5’, 5’’, 8, 10, 13;

2) Усталостная прочность зависит от всех предыдущих требований и от качества исполнения концентраторов напряжения: 3, 14.

3, 5′, 5″, 8, 10, 13, 14 – КЭПОН

Таблица 4.1 - Перечень требований КД (КЭПОН), которые требуется обеспечивать технологией на примере основных деталей двигателя

Деталь	Требования КД, определяющие надежность узла и двигателя	Показатель качества
Лопатка компрессора		
1.Перо и поверхности перехода к замку и полкам	1. Толщина пера у корня. 2. Параметры остаточных напряжений. 3. Отсутствие подрезов, забоин, рисок, прижогов, не равномерного наклепа.	- прочность. -сопротивление усталости. - запас прочности.
2.Замок	1. Допуск плоскостности рабочих поверхностей. 2. Конусность по длине хвостовика. 3. Взаимное смещение рабочих поверхностей зубьев хвостовика. 4. Угол клина рабочих поверхностей хвостовика.	- контактная выносливость. - долговечность. - долговечность. - долговечность.
3.Бандажные полки	1. Толщина и твердость покрытия по торцам. 2. Прочность сцепления покрытия с поверхностью. 3. Допуск плоскости. 4. Координаты полки, определяющие посадку при сборке.	- износостойкость. -износостойкость.-прочность. - прочность.

Окончание таблицы 4.1

Лопатка турбины		
1. Тело	1. Отсутствие дефектов в материале	-сопротивление усталости
1.Перо, поверхности перехода к замку и полкам внутри поверхности.	1.Толщина стенки. 2.Отсутствие засорений внутри полости. 3.Пропускная способность по проходной щели и по перфорации. 4.Отсутствие дефектов защитных покрытий.	-длительная прочность. -длительная прочность. -длительная прочность. -длительная прочность.
Диск К и Т		
1.Материал.	1.Отсутствие дефектов в материале.	-сопротивление усталости
2.Полотно диска.	1.Отсутствие забоин, рисок, вмятин и неравномерного наклепа. 2.Параметры остаточных напряжений.	-сопротивление усталости. -сопротивление усталости.
3.Пазы крепления лопаток.	1.Параметры остаточных напряжений.	-сопротивление усталости.
4.Поверхности лабиринта гребешкового типа	1.Шероховатость. 2.Скругление острых кромок. 3.Параметры остаточных напряжений.	-сопротивление усталости. -сопротивление усталости. -сопротивление усталости.

4.6 Запасы прочности и вероятность разрушения детали

Многие детали при работе в двигателе испытывают усталостное напряжение, неприятность которого заключается в опасности внезапного разрушения детали (перед разрушением нет никаких видимых причин, что оно сейчас произойдет).

Закономерности усталостного разрушения носят статистический характер, когда под действие одного и того же циклического напряжения число циклов до разрушения отличается на однотипичных деталях в несколько раз. Наиболее характерно это явление на лопатках турбины. Поэтому достоверные прогнозы надежности в этом случае можно сделать лишь на основе вероятностного подхода.

В сопротивлении материалов прочностная надежность оценивается:

$$\sigma_{\max} \le [\sigma]$$

Такая оценка допустима для каких-то однотипных конструкций, эксплуатирующихся в стабильных условиях напряжения. В двигателестроении этого нет, здесь распространение получило условие прочности надежность по запасам прочности по напряжениям:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{пред}}{\sigma_{\max}} \ge K_{\min} = \frac{\sigma_{пред}}{[\sigma]}$$

$$\sigma_{пред} = \begin{pmatrix} \sigma_в \\ \sigma_{в/\tau} \\ \sigma_{-1} \end{pmatrix}$$

Такая оценка прочности является детерминированной оценкой, т.е. она не связана с оценкой достоверности разрушающего и действующего значения параметров прочности, т.е. не учитывает разброс нагрузки и характеристик прочности.

Поэтому в двигателестроении чаще всего определяются и используются статистические коэффициенты запаса прочности, при расчете которых оценивается достоверность разрушающего и действующего параметра:

ζ – параметра нагрузки

η – параметра прочности

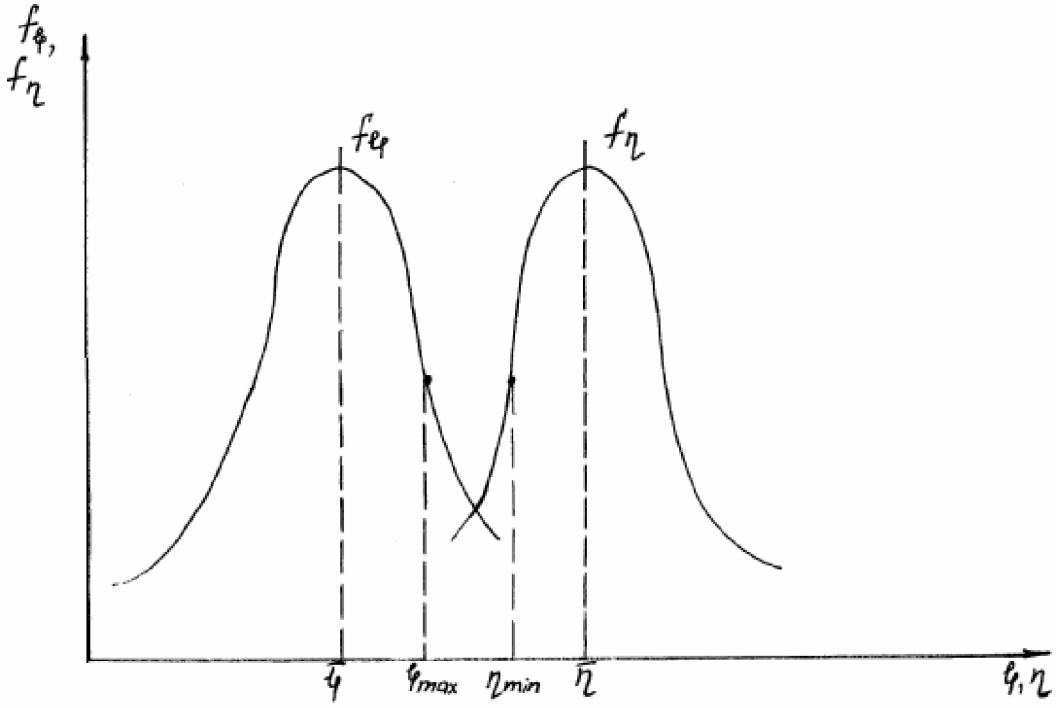


Рисунок 4.4 - Характер распределения прочности и нагрузки при определении статического коэффициента запаса прочности

$$K_{дет} = \frac{\bar{\eta}}{\bar{\zeta}}$$

$$K_{стат} = \frac{\eta_{\min}}{\zeta_{\max}}$$

$$K_{стат} = 0{,}5 \ldots 0{,}8\, K_{дет}$$

$$\eta_{\min} = \bar{\eta} - K_1\left(n_1, q_1, P_{g1}\right) \cdot S_\eta$$

$$\zeta_{\max} = \bar{\zeta} + K_2 \cdot (n_2, q_2, P_{q2}) \cdot S_\zeta ,$$

где K_1, K_2 – толерантные коэффициенты, которые определяются из таблиц в зависимости от:

n – число испытаний;

q – уровень значимости;

P_g – величина доверительной вероятности.

К (6; 0.01; 0.95)=2

Только из 1% всех деталей запас прочности может оказаться ниже 2, причем это справедливо для 95% случаев, а σ определена при 6 испытаниях.

Практика показала, что на вероятность разрушения разброс прочности влияет сильнее, чем разброс нагрузки. Отсюда вытекает необходимость предъявления более высоких требований к прочностным характеристикам материалов и деталей, а это в большей степени зависит от технологии.

4.7 Роль испытаний в обеспечении надежности

Основным видом испытаний вновь созданного двигателя являются 150-200 часовые длительные стендовые испытания, а так же дополнительные виды испытаний. К ним относятся: проверка при максимальной возможности температуры газа перед турбиной, проверка температуры при повышенных оборотах (на 5% от номинальной); виброрафирование; тензометрических лопаток К и Т; проверка рабочей способности Д, на забрасывание в К льда, воды, песка; проверка ГДУ.

На этих этапах испытаний снимают данные по параметрам с целью устранения их номиналов и полей рассеивания. После этого уже можно получить сведения для оценки ресурса и надежности двигателя.

Следующий этап – лётные испытания (двигатели устанавливают на летающую лабораторию). В полете фиксируются все его параметры. Все эти испытания проводятся в ОКБ. После этого двигатель передают в серийное производство, на заводе-изготовителе обязательными являются испытания по контролю качества. При этом контроле важно правильно установить объем выборки при испытаниях, он может быть либо 1 к 1 либо 1 к 10.

4.8 Организация работ по устранению дефектов и отказов при доводке изделия и его опытной эксплуатации

Все дефекты, обнаруженные при опытной эксплуатации или при разборке двигателя фиксируются в специальной документации. По особо опасным отказам выпускается специальный бюллетень с разработкой рекомендаций по его недопущению.

Основные принципы системы работ на данном этапе следующие:

1. Своевременное выявление и немедленная информация.
2. обязательный разбор, устранение причин и 100%-ая фиксация не зависимо от размера кажущейся случайности.
3. Разработка и внедрение мероприятий по устранению.

Все эти действия позволяют судить об интенсивности работы и определяют время поставки двигателя на государственные испытания.

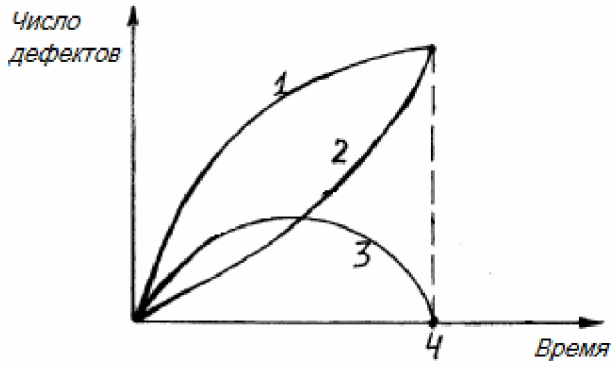


Рисунок 4.5 – Закономерность выявления дефектов при опытной доводке двигателя

1 – накопление дефекта

2 – устранение дефектов

3 – оставшиеся неустраненными

4 – время предъявления изделия на государственное испытание.

5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДЛА В УСЛОВИЯХ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Важнейшими показателями качества ГТД, которые обеспечиваются в производстве, являются показатели назначения, надежности и безопасности. В характере оценки этих показателей имеются существенные различия. Показатели назначения: тяга и удельный расход топлива в различных условиях полета - могут определяться в процессе стендовых испытаний двигателя непосредственно на предприятии. Надежность ГТД являются временной характеристикой. Основные показатели надежности, которые обеспечиваются в производстве, - ресурс и наработка на отказ - проявляются и соответственно могут быть непосредственно оценены вне производственного процесса - в условиях эксплуатации.

Поскольку надежность - это свойство двигателя сохранять работоспособное состояние или, иными словами, стабильно обеспечивать заданные показатели назначения, то решение проблемы надежности в условиях производства решает и проблему обеспечения качества ГТД в целом.

В условиях производства можно судить только о потенциальной надежности ГТД. При этом основным источником информации о надежности двигателя являются данные о качестве его деталей и сборочных единиц.

В этом свете выделяются два уровня в понятии качества продукции в производстве. Более высокий уровень - качество двигателя в целом. Другой уровень - качество деталей и сборочных единиц на различных стадиях их изготовления.

Оценка качества такой продукции осуществляется в процессе производства на основе соответствия ее параметров и характеристик и параметров режимов обработки требованиям конструкторской (КД), технологической (ТД) и нормативно- технической документации (НТД), а также на основе вида и уровня технологической наследственности от сопутствующих технологическому процессу явлений.

К сопутствующим явлениям технологического процесса относятся такие явления, как образование остаточных напряжений в поверхностном слое при механической обработке на размер, образование микротрещин, образование усадочных раковин в процессе перехода из жидкого состояния в твердое при отливке деталей, обезуглероживание в поверхностном слое при термообработке в воздушной среде, наводораживание деталей и др.

Параметры продукции - размеры, твердость, шероховатость поверхности, остаточные напряжения, а также режимы обработки - температура и продолжительность термообработки, усилие при монтаже, остаточный дисбаланс и другие - должны находиться в поле технического допуска на них. Также должно быть исключено негативное влияние сопутствующих явлений на качество продукции. Удовлетворение указанным требованиям является необходимым условием обеспечения заданной геометрии, определенных уровней усталостной и длительной прочности деталей, их коррозионной и эрозионной стойкости, износостойкости, вибрационных напряжений. Все эти свойства определяют качество деталей, сборочных единиц и двигателя в целом.

Геометрические параметры: размеры элементов конструкции и проходных сечений, шероховатость поверхности - определяют характеристики газовоздушного тракта и элементов топливной системы, а в целом - показатели назначения двигателя. Размеры элементов и их физико-химические свойства, характеризующие прочность и стойкость деталей, их взаимное расположение определяют ресурс и безотказность двигателя.

Таким образом, условие производственного обеспечения качества ГТД - изготовление продукции в строгом соответствии с требованиями КД, ТД, НТД.

Из общего числа выявленных недостатков по конструктивным и производственным причинам недостатки по производственным причинам составляют внушительную величину - до 40 %.

Производственные недостатки обусловлены, как правило, двумя основными группами причин: недостатками технологии и нарушением технологической дисциплины.

Недостатки технологии (или несоответствие технологии) - это неправильно назначенные методы и режимы обработки, состав технологического оборудования, квалификация исполнителя, последовательность операций, методы контроля. Кроме того, к недостаткам технологии относится отсутствие мероприятий по предотвращению негативного влияния сопутствующих явлений на качество продукции.

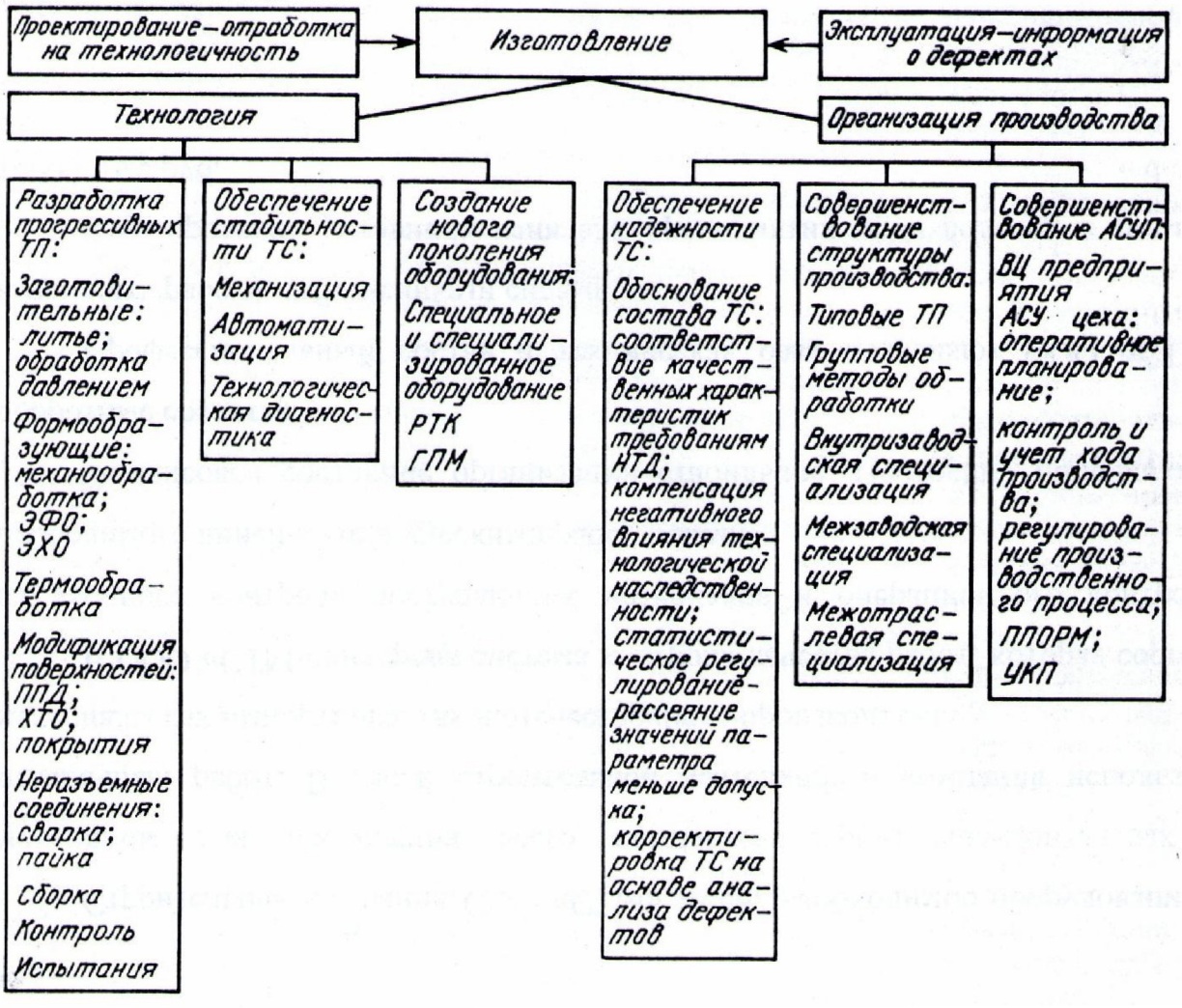


Рис. 5.1 - Система производственного обеспечения качества ГТД

Негативные сопутствующие явления технологического процесса являются причиной скрытых дефектов, которые проявляются в эксплуатации при выработке 30-90 % ресурса двигателя. За это время парк двигателей

становится большим, что усложняет проведение мероприятий по устранению недостатков.

Нарушение технологической дисциплины, как правило, является следствием недостатков в обеспечении нормальной работы исполнителей. К ним относятся: отсутствие необходимой технологической документации на рабочем месте; несоответствие оборудования, оснастки, режущего и мерительного инструмента установленным требованиям; несоответствие квалификации исполнителей; неритмичность обеспечения затоговками; низкий уровень механизации и автоматизации работ, а также недостаточный контроль за выполнением исполнителем требований технологии со стороны руководства подразделения (цеха).

Проблема производственного обеспечения качества ГТД усложняется тем, что в каждом новом поколении двигателей используются новые конструкционные материалы, требующие специальных методов обработки, новые покрытия, новые виды соединений.

Все это требует разработки и внедрения новых, прогрессивных технологических процессов (ТП), опирающихся на новейшие достижения науки и техники, разработку и создание оборудования. Организация производства должна обеспечить эффективное использование прогрессивной технологии и ритмичность производственного процесса.

Таким образом, основой производственного обеспечения качества ГТД является высокое совершенство производства - его технологии и организации, которое характеризуется способностью стабильно изготавливать продукцию в строгом соответствии с требованиями КД.

Совершенствование производства - непрерывный процесс, который осуществляется путем реализации комплекса мероприятий по ряду научно-технических направлений, образующих систему производственного обеспечения качества (ПОК) ГТД (рис. 5.1).

На процесс изготовления как основу ПОК ГТД существенное влияние оказывает технологичность конструкции, которая отрабатывается на этапе

разработки и создания образца двигателя и уточняется при постановке образца на серийное производство. Технологичные конструктивные решения позволяют, с одной стороны, в значительной степени механизировать обработку и сборку, применять экономически целесообразные заготовки, внедрять прогрессивные ТП и тем самым обеспечивать стабильность качества продукции.

С другой стороны, на процесс изготовления, на технологию производства оказывает влияние эксплуатация как источник информации о реальном уровне надежности ГТД и конкретных производственных недостатках, на основе которой осуществляются корректировка и совершенствование технологических систем.

5.1 Прогрессивные технологические процессы

Технологические процессы должны отвечать ряду требований, в том числе по производительности, себестоимости и др. Приоритетным требованием является обеспечение качества двигателя. В свете этого при разработке новых ТП необходимо руководствоваться в первую очередь двумя принципами: повышением качества продукции и обеспечением высокой стабильности процесса.

Развитие технологических процессов и оборудования идет, с одной стороны, в направлении создания благоприятных условий обработки деталей и сборочных единиц как средства повышения их качества (обработка в условиях вакуума - литье, термообработка, покрытия, электронно-лучевая сварка; обработка давлением в состоянии сверхпластичности материала; многоинструментальная обработка, исключающая деформацию детали и другие) и, с другой стороны, - в направлении непосредственного улучшения функциональных свойств деталей и сборочных единиц (химико-термическая обработка, модификация поверхности, электрофизические и электрохимические способы обработки, технология обработки прогрессивных конструкционных материалов и др).

Качество деталей и сборочных единиц формируется комплексом ТП: заготовительными, формообразующими, термической обработкой, модификации поверхности, соединения деталей, сборки, контроля и испытаний.

5.2 Обеспечение надежности технологической системы изготовления ГТД

Основу надежности технологической системы (ТС), элементами которой являются оборудование, приспособления, инструмент, предмет производства, исполнитель, составляет способность ее производить продукцию с геометрическими и физико - механическими характеристиками, которые удовлетворяют требованиям КД и НТД.

Задача обеспечения надежности ТС решается по трем направлениям.

Первое, основное, направление - обоснование выбора ТП и соответствующего состава ТС на этапе технологической подготовки производства (ТПП).

Второе направление - статистический анализ и статистическое регулирование ТС на основе систематического наблюдения за изменением статистических характеристик продукции.

Третье направление - корректировка ТС на основе причинно-следственного анализа брака, дефектов и отказов, выявляемых при изготовлении, испытаниях и в эксплуатации.

Обоснование состава ТС на этапе ТПП. Одной из главных причин производственных дефектов, обусловленных недостатками технологии, является невысокий уровень ТПП, что выражается в недостаточной обоснованности назначения методов и режимов обработки, последовательности операций и переходов, методов и точности контроля, точности средств технологического оснащения, квалификации исполнителя.

Обеспечения качества продукции в настоящее время добиваются главным образом многостадийной доводкой ТП по результатам изготовления, испытания деталей и узлов, а также по результатам

эксплуатации изделий. Доводка ТП при этом растягивается во времени, так как неблагоприятное сочетание характеристик элементов ТС имеет случайный, вероятностный характер, а негативное влияние сопутствующих явлений, как уже указывалось, сказывается вне производственного процесса - при эксплуатации изделия.

Реализация мероприятий по данному направлению преследует цель сместить усилия в обеспечении качества продукции в сторону повышения уровня ТПП. Это направление нашло отражение в отраслевом стандарте ОСТ 1.42314-89 "Надежность в технике. Технологические системы. Обеспечение требований конструкторской документации". Целевая направленность стандарта - предупреждение отказов и неисправностей изделий по производственным причинам путем обеспечения надежности ТС.

Методика стандарта базируется на количественном и качественном анализе технологических систем и технологических операций с оценкой их способности стабильно обеспечивать требования конструкторской и нормативно-технической документации как условия получения качественной продукции.

Состав ТС назначается в соответствии с характером технологических операций. Характеристики ТС: погрешности оборудования, методов измерения, размеры режущего инструмента, режимы обработки, условия эксплуатации оборудования и средств контроля, квалификация исполнителя - определяются на основе НТД, паспортов оборудования, чертежей приспособлений-аналогов и другой документации. При этом состав ТС, технологические операции и их последовательность должны удовлетворять расчетным требованиям к количественным характеристикам ТС, выражающим условие, чтобы диапазон значений суммы погрешностей ТС был меньше допуска на обеспечивающий данное требование КД параметр продукции или режима обработки; исключать недопустимый уровень негативного влияния технологической наследственности от сопутствующих явлений технологического процесса.

Для обеспечения особо ответственного требования КД к качественным характеристикам ТС: оборудованию, инструменту, состоянию предмета производства, условиям эксплуатации ТС, квалификации исполнителя - могут быть предъявлены более высокие требования, чем те, которые рекомендованы НТД. Например, если в данной операции требованием к квалификации исполнителя является пятый разряд, то повышенным требованием могут быть пятый разряд и аттестация исполнителя на данную операцию.

Повышенные требования могут предъявляться к инструменту, чистоте детали или приспособления, к производственным помещениям и рабочим местам, а также при установлении приемов и регламентации усилий при ручной обработке в случае отсутствия соответствующих требований КД.

В основе расчета требований к количественным характеристикам ТС лежит тот факт, что выход годной продукции зависит от соотношения суммарной погрешности ТС и допуска Т на параметр.

Всякая ТС обладает случайными погрешностями, которые являются причиной рассеяния значений параметра в партии продукции. Погрешности ТС обусловлены неточностью изготовления оборудования, инструмента, рассеянием размеров и формы заготовок, колебанием элементов станка и нестабильностью режимов обработки, погрешностью измерений при настройке станков и контроле размеров при обработке, ошибками исполнителей и др. Суммарную величину случайных погрешностей принято характеризовать средней квадратичной величиной $\square_т$, а критерий точности ТС применительно к определенной операции с заданным допуском Т-отношением $Т/\square_т$. Этим отношением определяется вероятность выхода годной продукции.

При нормальном законе распределения суммарной величины случайных погрешностей, наиболее характерном для технологического оборудования, влияние $Т/\square_т$ на выход годной продукции при настройке ТС на середину

допуска характеризуется следующими величинами, приведенными в табл. 5.1.

Таблица 5.1

T/□$_т$	**2**	**4**	**6**	**8**
P - вероятность выхода годной продукции (%)	**68,32**	**95,44**	**99,73**	**99,994**

При T/□$_т$ = 6 доля дефектной продукции составляет менее 0,3 %. Принято считать, что шестисигмовые границы допуска с высокой гарантией обеспечивают изготовление годной продукции. Максимальные значения суммарной случайной погрешности составляют б = ±З□$_т$.

На величину вероятности P выпуска годной продукции влияет также точность технологических систем контроля, которая определяется отношением средней квадратичной погрешности системы контроля □$_к$ к допуску T - □/T, так как в зависимости от погрешности измерений часть негодной продукции может быть признана годной, а годная - неправильно забракованной.

При малой относительной погрешности ТС изготовления (T/□$_т$ ≥ 6) и высокой точности измерительной системы вся принятая продукция с высокой гарантией будет годной, при незначительной доле продукции, забракованной неправильно.

Для стабильного обеспечения выпуска качественной продукции и снижения доли неправильно забракованной годной продукции необходимо выполнение требования T/□$_т$≥ 8... 10.

Помимо случайных погрешностей на практике имеются систематические погрешности. Систематические погрешности являются причиной смещения значений параметра продукции относительно уровня настройки - смещается кривая распределения, обусловленная случайными погрешностями.

Требования к количественным характеристикам ТС устанавливаются на основе анализа возможности реализации технического допуска. С этой целью

вычисляются суммарные погрешности ТС по верхней и нижней границам допуска

$$\delta_{T\Sigma}^{B} = \delta_T + \delta_{TC}^{B} + \Delta_{зап};$$

$$\delta_{T\Sigma}^{H} = \delta_{T\Sigma}^{B} = \delta_T + \delta_{TC}^{B} + \Delta_{зап};$$

и определяется коэффициент точности

$$K = \frac{\delta_{T\Sigma}^{B} + \delta_{T\Sigma}^{H}}{T};$$

где

$\delta_T = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \delta_i^2}$ - суммарная случайная погрешность ТС по вероятностному методу;

δ_i - предельное значение элементарной случайной погрешности;

$\boldsymbol{\delta_{TC}^{B}} = \sum_{i=1}^{n} \delta_i^2$; $\boldsymbol{\delta_{TC}^{H}} = \sum_{i=1}^{n} \Delta_i^H$; Δ_i^B ; Δ_i^H -суммарные и элементарные систематические погрешности относительно верхней и нижней границ допуска**;**

$\Delta_{зап}$ **= 0,5nT -** запас по параметру.

Поскольку размах случайных погрешностей в рассматриваемой методике составляет $2\delta_т = 6\square_т$, то для повышения требований к точности ТС введен запас $\Delta_{зап}$. Коэффициент n связан с отношением $T/\square_т$ выражением $n = T/6\square_т - 1$. В соответствии с этим выражением при отсутствии запаса, т.е при $T/\square_т = 6$, n =0, условию $T/\square_т = 8$ соответствует n = 0,33, условию $T/\square_т = 10$ соответствует n = 0,67.

Таким образом, величиной n технолог может управлять качеством продукции. Важно при этом иметь в виду, что запас по параметру необходим для гарантированной компенсации непредусмотренных погрешностей настройки и трудно поддающихся учету случайных погрешностей элементов ТС (упругие и тепловые деформации, износ, люфты) и снижения, как ранее было указано, доли неправильно забракованной годной продукции.

При $К \leq 1$ сумма всех погрешностей с учетом запасов по параметру меньше допуска и ТС, таким образом, отвечает предъявленным к ней требованиям по количественным характеристикам.

Важным аспектом обеспечения требований КД является исключение недопустимого уровня негативного влияния сопутствующих ТП явлений на технологическую наследственность.

Вид технологической наследственности и количественная оценка влияния ее на свойства предмета производства определяются на основе НТД и информационно- справочных материалов.

В целях исключения негативного влияния сопутствующих явлений производится анализ влияния технологических операций, предшествующих и следующих за операциями, где выполняется требование КД и осуществляется приемочный контроль, на возможность изменения свойств предмета производства. Так, например, перед операцией газовой цементации проверяется чистота поверхности - отсутствие от предыдущих операций окалины, окисной пленки, органики, при наличии которых возможны такие последствия, как пятнистая твердость и разброс содержания углерода. Процесс цементации обеспечивается определенным составом газовой смеси, определенными значениями температуры и определенной продолжительностью насыщения. Сопутствующее процессу цементации .негативное явление -изменение шероховатости - должно компенсироваться в дальнейшем шлифованием. Можно отметить также, что при закалке, непосредственно следующей за процессом цементации, возможно коробление предмета производства, а при шлифовании - прижоги. Поэтому необходимо предусмотреть мероприятия по предотвращению указанных явлений.

В случае отсутствия необходимых для анализа ТС данных по технологической наследственности необходимо провести специальные исследования для их определения.

Важным требованием методики является обязательное составление вспомогательного информационного документа - "Карты обеспечения требований КД". В этом документе представляются результаты анализа и обоснование выбранного варианта ТС.

На основе таких карт по всем ответственным параметрам деталей и сборочных единиц изделия можно в значительной степени судить об уровне производственного обеспечения качества ГТД.

Помимо обоснования состава ТС методика стандарта позволяет производить анализ действующих ТС и вскрывать причины низкой стабильности процесса, о чем свидетельствуют брак, карточки разрешения, а также дефекты и отказы изделия в эксплуатации.

5.3 Статистический анализ точности обработки и статистическое регулирование технологических процессов

В случаях, когда результаты обработки могут быть определены непосредственным измерением параметров продукции, оценка точности ТС может быть произведена на основе статистического анализа качества продукции. В отечественном авиадвигателестроении статистические методы не стали действенным, постоянно работающим инструментом службы технического контроля. Основными причинами этого являются:

- недопонимание роли статистических методов;

- отсутствие подготовленных в этой области специалистов;

- отсутствие комплексной автоматизации таких операций, как измерение, вычисление статистических характеристик, анализа измерительной информации, выдачи команд для подналадки технологического оборудования;

отсутствие рабочих методик статистического анализа и унифицированных алгоритмов.

5.4 Корректировка ТС на основе причинно-следственного анализа брака, дефектов и отказов

Появление брака, дефектов и отказов свидетельствует о недостаточной надежности и стабильности некоторых элементов ТС и требует оперативного проведения мероприятий по их предотвращению. Трудности на этом пути состоят в том, что многие дефекты носят скрытый характер и установление причин их появления представляет сложную задачу. Дело в том, что один и тот же дефект может быть обусловлен различными причинами конструктивного, производственно-технического или эксплуатационного характера. В то же время достоверность причины возникновения дефекта определяет эффективность вырабатываемых мероприятий по их устранению. Следствием указанных трудностей является то, что выработка мероприятий по предотвращению дефектов в настоящее время требует в среднем 135 дней, а в ряде случаев и 3-3,5 года.

Для ускорения процессов доводки и обеспечения заложенного в конструкцию уровня надежности возникает необходимость разработки и внедрения информационно-поисковой системы на базе ЭВМ с совершенной информационной базой. Такая система должна включать накопитель и каналы прямой и обратной связи. **В** накопителе - банке данных - систематизируется информация о дефектах и апробированных мероприятиях по их предотвращению. И, естественно, чем больше в банке данных объем массива статистических данных, аккумулирующий в себе опыт авиадвигателестроения, тем выше вероятность установления причины вновь появляющихся дефектов. По каналу прямой связи направляется запрос в систему с описанием дефекта (деталь, технология изготовления, дислокация) и его характера.

По каналу обратной связи при наличии соответствующей информации выдаются причина дефекта и мероприятия по его предотвращению.

5.5 Понятие технологичности продукции

Технологичность конструкции изделия – есть совокупность свойств конструкций, которые обеспечивают изготовление, ремонт и техническое обслуживание изделия по наиболее эффективным технологиям (с меньшими

затратами) в сравнении с аналогичными конструкциями при одинаковых условиях их использования и эксплуатации, а так же при одних и тех же показателях качества. Различают производственную, ремонтную и эксплуатационную технологичность конструкции изделия (ТКИ).

Производственная ТКИ проявляется в сокращении средств и времени на конструктивную и технологическую подготовки производства, а так же на процесс изготовления и монтажа изделия заказчика.

Эксплуатационная ТКИ проявляется в сокращении средств и времени на подготовку к использованию изделия, на техническое обслуживание, ремонт и утилизацию.

Ремонтная ТКИ проявляется в сокращении средств и времени на все виды ремонта, кроме текущего.

ТКИ определяется системой качественных характеристик. К ним относятся: взаимозаменяемость узлов и агрегатов, регулируемость контроля пригодности, доступность инструментов, технологичность по процессу изготовления и технологичность по форме, размерам и габаритам.

С другой стороны, ТКИ определяется рядом количественных показателей. Они называются показателями технологичности конструкции – ПТК.

1. Основные ПТК:

- трудоемкость изготовления (ТИ)
- технологическая себестоимость (ТС)
- уровень технологичности ТИ (УТТИ)
- уровень технологичности ТС (УТТС)

Уровень технологичности есть отношение достигнутого показателя к базовому (аналогичное изделие).

2. Дополнительные ПТК:

- относительная трудоемкость заготовочных работ
- относительная трудоемкость видов процесса изготовления
- КИМ

- коэффициент точности $K = 1 - \frac{1}{A_{ср}}$, где $A_{ср}$ - средний квалитет обработанного изделия.

$A_{ср} = \frac{\sum A_i \cdot n_i}{\sum n_i}$, где A_i - квалитет обработки, n_i - число поверхностей, соответствующих этому квалитету

- коэффициент шероховатости $K_ш = 1 - \frac{1}{Б_{ср}}$, где $Б_{ср}$ - среднее значение параметра шероховатости

$Б_{ср} = \frac{100n_{100} + 10n_{10} + 0.1n_{0.1} + 0.008n_{0.008}}{n_{100} + n_{10} + n_{0.1} + n_{0.008}}$, где 100, 10, 0,1, 0,008 – числители значения шероховатости по R_a; n – число поверхностей с соответствующим значением шероховатостей.

5.6 Сопутствующие явления технологического процесса

К сопутствующим явлениям технологического процесса относятся все дополнительные воздействия и их проявление в детали при применении операции в основном назначении. Так, например, при механической обработке в целях получения фирмы, размеров и шероховатости поверхности вследствие сил резания, температуры процесса, условий крепления, воздействия технологической (СОЖ) и окружающей среды в детали дополнительно образуются; наклеп, остаточные напряжения, окислы на поверхности, структурные изменения (прижоги при шлифовании), вмятины от крепления, следы обработки, продукты износа режущего инструмента на поверхности, остатки СОЖ, внедрение (шаржирование при применении абразива) крупных частичек режущего инструмента и др.

При термической обработке в целях формирования нужной структуры материала вследствие высокой температуры, воздействия окружающей среды, контакта с приспособлением в детали дополнительно образуются остаточные напряжения, окислы, обеднение поверхности некоторыми

химическими элементами, деформация детали, изменении размеров и шероховатости поверхности и др.,

Любая операция технологического процесса при ее применении в основном назначении оказывает на деталь дополнительные сопутствующие воздействия.

Эти сопутствующие явления (или воздействия) могут оказать положительное или отрицательное влияние на эксплуатационные свойства детали.

Проведена систематизация этих явлений;

- наклеп;
- остаточные напряжения;
- структурные и фазовые изменения материала;
- изменение формы, взаимного положения поверхностей и размеров; повреждение поверхностей;
- несплошности;
- химические соединения;
- насыщение материала химическими элементами технологической среды;
- обеднение материала химическими элементами и соединениями;
- изменение шероховатости поверхности;
- инородные включения;
- анизотропия свойств, местное изменение свойств;
- ликвиды (заусенцы, облой, дефектный слой и т.п.).

Рассмотрим влияние некоторых из этих явлений.

5.6.1 Наклеп

Наклеп - сдвиг в зернах металла, искажение кристаллической решетки, изменение формы и размеров зерен.

Причина наклепа - силовое воздействие на деталь. Примеры операций, где имеется силовое воздействие: механическая обработка лезвийным

инструментом (точение, строгание, фрезерование, сверление и т.п.), притирка, шлифование, штамповка, ковка, обкатка, обработка дробью ж т.п.

- В штамповке, поковке наклеп распространяется на все сечение детали - равномерный наклеп.

В других операциях наклеп распространяется на поверхностный слой - неравномерный наклеп. Характеристики наклепа:

- степень наклепа: отношение показателя твердости наклепанного и ненаклепанного слоев металла,

- глубина наклепа: от поверхности до ненаклепанного металла.

Равномерный наклеп существенно, на ~ 150 % повышает механические свойства детали. Отсюда следует, что штамповку выгодно применять в целях повышения запаса прочности или, при сохранении запаса прочности, в целях снижения веса детали.

Степень наклепа должна быть ограничена, т.к. возможен, при определенных режимах, перенаклеп с образованием отслоений или трещин.

Наклеп устраняется наиболее полно термообработкой, например, при отжиге стали, частично - травлением, притиркой и т.п. операциями. Наклеп повышает:

- диффузионную проницаемость,
- магнитную проницаемость,
- твердость,
- усталостную прочность,
- износостойкость,
- сопротивляемость действию изгибных нагрузок и крутильных колебаний.

Наклеп снижает:

- коррозионную стойкость;
- теплопроводность,
- электропроводность,
- пластичность,

Неравномерный наклеп не влияет на сопротивляемость детали одноосному нагружению (сжатию или растяжению).

На формирование новых или влияние на заданых эксплуатационные свойства оказывают финишные операции. Однако, в некоторых случаях, сказывается и глубина и степень наклепа от предшествующих операций, т.е. имеет место наследственность операций.

Примеры по характеристикам наклепа: точение, растачивание, фрезерование сталей - глубина наклепа до 0,2...0,5 мм, степень наклепа 135...160 %.

Примеры учета и регламентации наклепа:

- в конструкторской документации: назначение штамповки, поковки, отжиг для прокладок из металла, назначение дробеструйной обработки или выглаживания и т.п.;
- в технологической документации; назначение промежуточного отжига.

5.6.2 Остаточные напряжения

Остаточные напряжения возникают в процессе нагрева и охлаждения, при пластическом деформировании, при структурном изменении материала детали, узла.

Примеры операций: закалка, шлифование, операции с силовым воздействием (точение, фрезерование, сверление, зенкерование), ХТО, гальванические (остаточные напряжения из-за разности коэффициентов линейного расширения покрытия и основы) и др. Характеристики остаточных напряжений:

- вид: остаточные напряжения сжатия или растяжения, сжатие со знаком "минус", растяжение - "плюс";
- величина в кгс/см^2 или кгс/мм^2;
- глубина в мм от поверхности к сердцевине до точки, где остаточные напряжения равны нулю.
- градиент: плавный, неплавный переход,

Очень важен вид остаточных напряжений. Остаточные напряжения растяжения способствуют расклиниванию несплошностей с острым устьем (трещины) при нахождении детали в жидкой среде, например, жидком припое, в СОЖ, в составах ванн и т.п.

При вращении деталей динамические силы создают напряжения растяжения. Эти напряжения, складываясь с остаточными напряжениями растяжения, суммарно, могут достигнуть и даже превысить предел прочности материала. Остаточные напряжения растяжения на большинстве применяемых в авиационной промышленности материалах образуются после шлифования, сверления, зенкерования, развертывания, гальванопокрытия. После точения могут образоваться как напряжения сжатия, так и напряжения растяжения в зависимости от режимов обработки, геометрии резца, вида СОЖ

Величина остаточных напряжений при сложении их с рабочими напряжениями не должна превышать предела текучести.

Остаточные напряжения уменьшаются нагревом детали до высокой температуры (отжиг для сталей); стравливанием слоя, уменьшением жесткости детали, нагружением до податливости детали в направлении остаточных напряжений, при ползучести материала (релаксация).

Вид, величина остаточных напряжения, влияющие на свойства детали, формируются в финишных операциях, а глубина их залегания и градиент может наследоваться от предшествующих операций.

Примеры отказов из-за остаточных напряжений:

- при осмотре обнаружены трещины в диске турбины, исходящие от отверстий крепления диска с валом, в целом снято с эксплуатации более 200 двигателей (!), причина - остаточные напряжения растяжения на поверхности после сверления отверстий,

- поломка шасси при посадке самолета, причина - остаточные напряжения растяжения на поверхности гидроцилиндра, образованы при шлифовании поверхности,

- поломка коленвала двигателя внутреннего сгорания, причина - остаточные напряжения растяжения после шлифования.

Примеры на характеристики:

- фрезерование титановых сплавов, формируются остаточные напряжения сжатия - 40...50 кгс/мм^2, на глубину до 0,06 мм и далее переходят в напряжения растяжения до +12 кгс/мм^2, снижается усталостная прочность на 2...7 кгс/мм^2;

- точение ЭИ787, ЭИ96Ш, остаточные напряжения растяжения, +10...70 кгс/мм^2.

Примеры учета и регламентации остаточных напряжений:

- в конструкторской документации; величина и глубина залегания напряжений сжатия на поверхности всех вращающихся деталей двигателя (валы, диски, лопатки компрессора и т.п.); ограничения величины остаточных напряжений растяжения; формирование напряжений сжатия на поверхностях деталей, работающих на усталостную прочность, на изгиб и кручение, в условиях вибрации и т.п.;

- в технологической документации: назначение термообработки для уменьшения величины остаточных напряжений, назначение операций, формирующих напряжения сжатия, под гальваническое покрытие и др.

5.6.3 Изменение размеров

Изменение размеров после изготовления или при изготовлении происходит при переходе металла из жидкого состояния в твердое, например, при сварке, при ползучести металла, при распаде неустойчивых структур, например, аустенита в мартенсит.

Эти изменения размеров важны при работе особо точных устройств, например, в золотниковых парах, в подшипниках и др. В таких деталях содержание аустенита не должно превышать ~10 %. Содержание аустенита регулируется термообработкой - обработкой холодом.

В конструкторской документации эти явления не регламентируются.

Неустойчивые структуры часто формируются на ранних стадиях технологического процесса.

5.6.4 Структурные и фазовые изменения

Структура и фазовый состав формируется при приготовлении сплава и в термических процессах, например, при ХТО, термообработке.

Однако, под действием местной высокой температуры в процессах, например, при шлифовании, электрохимической обработки, точении без СОЖ, образуется структура. Другая структура соответственно имеет другие, отличные от основного материала, физические и механические свойства. В любом случае эта местная структура-концентратор напряжения, созданы остаточные напряжения. Эти явления ухудшают усталостную прочность, снижают коррозионную стойкость. Некоторые структурные образования повышают износостойкость, например, аустенитно-мартенситная структура (белый слой) при шлифовании 30Х13, 13ХПН2В2МФ. Прижоги при шлифовании титановых сплавов, местное оплавление при клеймении электрографом, "α" - слой на поверхности титановых сплавов после термообработки, в отливке - снижается усталостная прочность.

Структурная неоднородность может быть и по сечению детали, например, в отливке, в штамповке. В этом случае наследственность очевидна.

Структурная неоднородность на поверхности может быть устранена только снятием слоя металла, например, травлением, полировкой. Примеры отказов:

- развитая трещина на наружной тонколистовой оболочке двигателя из титанового сплава из-за наличия "α" - слоя вследствие нарушения нейтральной атмосферы при проведении термообработки,

- разрушение валика привода шестеренчатого насоса по месту клеймения электрографом,

- прижоги на пере лопатки компрессора привели к ее разрушению и остановке двигателя в полете.

В конструкторской документации необходимо регламентировать эти явления специальными указаниями или директивной технологией.

5.6.5 Повреждения

Повреждается только поверхностный слой детали.

Причина - силовое воздействие от зажима, приспособлений, следы от режущего инструмента, растравливание поверхности и др.

Повреждений - концентраторы напряжений, снижают усталостную прочность. При сжатии детали повреждения не ухудшают прочности. Снижается прочность детали при ее растяжении, если следы повреждения поперечны направлению нагрузки. То же для деталей, работающих на изгиб и кручение.

При точении - надиры, разрывы поверхности из-за нароста на резце, следы приспособления от зажима.

При шлифовании - царапины стружкой, находящейся в СОЖ, риски, дробления из-за дисбаланса и т.п.

Примеры снижения усталостной прочности:

- на 2 % из-за вмятины без зареза,
- на 24 % из-за царапины после шлифования,
- на ~66 % из-за риски глубиной до 0,24 мм, в мягком материале,
- на ~45 % из-за риски, царапины глубиной 0,02 мм, в твердой стали.

Повреждения и способ их устранения должны регламентироваться конструкторской документацией.

5.6.6 Насыщение, обеднение материала химическими элементами

О насыщении говорят, если количество какого-либо элемента превышает заявленное, по ТУ, количество элемента в химсоставе материала.

Обеднение - уменьшение против установленных норм содержания химических элементов в материале детали.

При насыщении повышается дефектность кристаллов и зерен, могут образоваться хрупкие химические **соединения** или неустойчивые при данной температуре структуры.

Некоторые химические элементы, насыщая поверхностный слой, повышают износостойкость. Вредное явление - наводороживание, приводит к разрушению детали. Наводороживание способствует силовое воздействие при наличии водородосодержащей среды, например, воды, СОЖ, активно - при гальванических процессах.

Удаляется наводороживание нагревом детали выше 230 **°С.**

Норма наводороживания - < 0,015 %. Технологический процесс должен исключать содержание водорода в детали более нормы.

Обеднение происходит активно при повышенных температурах с поверхности детали. Соответственно, ухудшаются физико-механические свойства, ухудшается износостойкость, снижается прочность. Часто - обезуглероживание при термообработке в воздушной атмосфере. Снижается усталостная прочность стали на 40...70 %.

Выводы:

- сопутствующие явления необходимо исследовать до проявления их в виде скрытого дефекта.

Весь этап серийного производства можно разбить на следующие подэтапы:

1. заготовительное производство;
2. механосборочное;
3. сборка;
4. испытания.

5.7 Обеспечение надежности на этапе получения заготовок

Центральным вопросом в этом производстве является вопрос обеспечения требований. КД в части структуры и фазового состава материала. Это зависит от следующего:

а) от способов и режимов нагрева (охлаждение при штамповке и термообработке)

б) от способов кристаллизации при отливках

в) от наличия газовых примесей в отливках

г) от условий и режимов сварки.

Имеет место случай получения заготовок, когда четырех-пятикратные запасы прочности материала уничтожаются в ходе получения заготовок (наиболее это проявляется на титановых сплавах). Это связано с тем, что трудно обеспечит стабильный температурный режим при штамповке и уровень вакуума при отливке, а это сказывается на изменении фазового состава титанового сплава.

Поэтому на этапе получения исходных заготовок , основные условия обеспечения надежности следующие:

1. четкая организация контроля режимов и состояния технологичности оборудования.
2. металлографические и другие виды контроля заготовок.

5.8 Механосборочный этап

На первом месте обеспечения надежности выступает технологическая наследственность. Под технологической наследственностью понимают перенесение на готовую деталь в процессе ее изготовления погрешностей механических и физических свойств исходной заготовки, а так же погрешностей и всех этих свойств, формирующихся на деталях в отдельных операциях.

Каждая операция ТП предназначена для достижения определенной цели. В тоже время, выполняя свое основное назначение, любой процесс обработки вносит в тело детали и ее поверхностный слой данные, сопутствующие этому процессу явления. Сопутствующими явлениями может быть следующее:

- копирование погрешностей ($\omega_{дет} = к \cdot \omega_{заг}$ - формула копирования);
- наклеп;
- изменение шероховатости;
- остаточные напряжения;
- структурные и фазовые изменения;

- повреждение поверхностей (риски, следы от зажимов, расстравливание);
- проявление химической реакции на поверхности детали;
- насыщение материала химическими элементами ТС;
- обеднение материала поверхностного слоя химическими элементами;
- инородные включения;
- анизотропия свойств (местное изменение свойств поверхностного слоя).

Технологически наследуются многие виды сопутствующих явлений, поэтому качество деталей создается не непосредственно на заключительной операции, а обеспечивается всем комплексом операций ТП.

5.9 Примеры технологической наследственности

1. Исследовались кольца в количестве 200 штук из материала ШХ15.

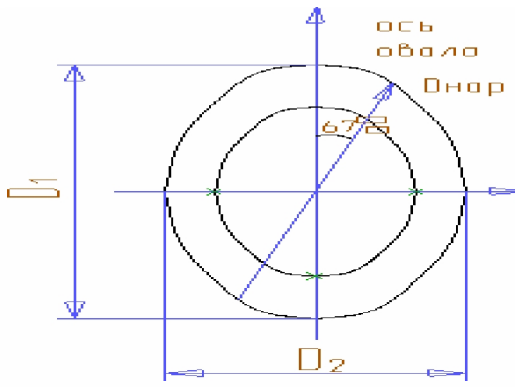


Рисунок 5.2 – Овальность, равная D_1-D_2

Операция	овал, отверстие, мм	положение большого овала отверстия
1.Заготовка	0,1	-
2.Токарная	0,1	повернуто на 67° относительно оси большого овала
3.Т/О	0,03	-
4.Вылеживание (15 дней)	0,036	-
5.Шлифование	0,006	-
6. Хранение (12 месяцев)	0,01	-

Вывод: технологически наследуется величина овальности по наружной поверхности при токарной обработке заготовки, а так же положение оси овала внутреннего диаметра при всех последующих после токарной операциях.

2. Типичным примером проявления технологической наследственности является шлифование, цементирование и закалка поверхности, которая до данной химико-термической операции (ХТО) была выполнена с некоторой погрешностью относительно базы. Это типичный случай шлифования профиля зуба. ХТО – это цементация + закалка (58…65 HRC) (подвергается сталь с С<=0,2%)

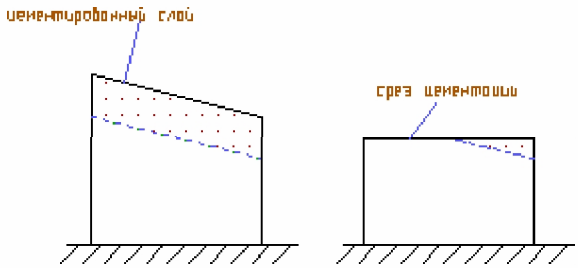


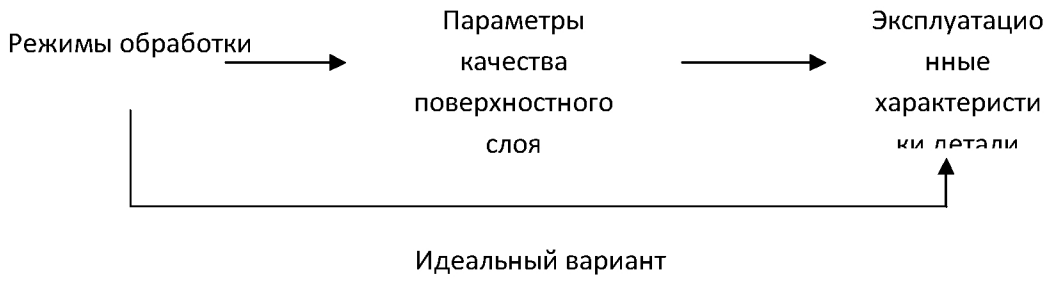
Рисунок 5.3

3. Типичный пример технологической наследственности – появление прижога. Прижогом называется местное структурное изменение металла и микротвердости поверхности в различных местах (пестрота микротвердости) при шлифовании. Прижог характерен для сталей, которые идут на изготовку зубчатых колес, валов, титановых сплавов. Слабые прижоги, сопровождающие падение микротвердости, способствуют возникновению в поверхностном слое растягивающих остаточные напряжения и визуально они не обнаруживаются. Поэтому все ответственные детали: шестерни, диски, лопатки – подвержены контролю на прижог (поверхность травится в кислоте).

Технологическая наследственность может проявляться с самой неожиданной стороны.

5.10 Управление технологической наследственностью

Проявление наследственности может привести как к улучшению, так и к ухудшению эксплуатационных свойств. Для повышения фактического уровня наследственности необходимо усиливать эффект благоприятной технологической наследственности и ослаблять или уничтожать эффект неблагоприятной наследственности.



Установить зависимость режима обработки и эксплуатационной характеристики весьма сложно, а иногда результат получается противоположный (рис. 5.4).

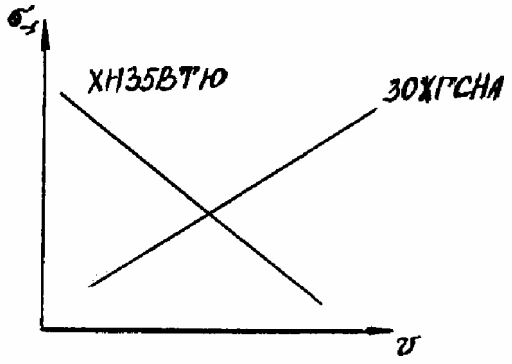


Рисунок 5.4 – Влияние скорости резания (V) на усталостную прочность (σ-1) при точении для различных материалов

В практике чаще всего ограничивается качественными характеристиками. Например: при фрезеровании нержавеющей стали цилиндрическими фрезами, переход от попутного фрезерования к встречному позволяет повысить предел усталостной прочности примерно на 10%.

Управлять технологической наследственностью значит усиливать ее благоприятные проявления и ослаблять или уничтожать неблагоприятные с помощью создания специальных барьеров.

Барьерами являются термообработка и методы упрочнения.

Поскольку факторы, влияющие на надежность в процессе производства чаще всего действуют скрытно, важно, что технологи постоянно следили за обеспечением надежности путем выбора и строгого соблюдения всех предписаний, касающихся инструмента и его состояния, режимов резания, состояния оборудования. И все предложения по изменению технологии должны проверяться с позиции их влияния на качество детали.

5.11 Рекомендации по управлению технологической наследственностью

1. Разделение чистовых и черновых этапов обработки и операций по этапам.
2. Обеспечение возможно большей равномерности снимаемых припусков (особенно для лопаток).
3. Повышение жесткости технологической системы.
4. Строгое соблюдение технологической дисциплины (геометрия инструмента, СОЖ, оснастка и др.).
5. Стабилизация ТП (автоматизация и механизация, исключающая субъективный фактор).
6. Использование типовых и унифицированных ТП.

5.12 Методика и виды контроля в серийном производстве

Высоконагруженное изделие невозможно изготовить вез постоянного и разностороннего контроля качества выполненных работ, а так же технологического состояния элементов ТС. В серийном производстве организованы следующие виды контроля:

1. Входной контроль материалов и комплектующих.
2. Цеховой операционный контроль на этапе производства и выходной контроль с предъявлением заказчику.

3. В ходе сборки контроль сборочных параметров и функциональных характеристик узлов и агрегатов.
4. Приемно-сдаточные испытания двигателя, проверка единого изделия на ресурс.

Все методы контроля в зависимости от объекта можно разделить на 2 группы:

1. контроль детали (объект – деталь)

1.1 внешний осмотр и измерения

1.2 магнитный контроль (магнофлокс)

1.3 ультразвуковой контроль

1.4 рентген-контроль

1.5 люминесцентный контроль - контроль поверхностных дефектов

1.6 контроль твердость (микротвердость)

1.7 контроль шероховатости

1.8 контроль функциональных характеристик

2. контроль образцов

2.1 химический и фазовый состав

2.2 твердость (микротвердость)

2.3 физико-химические параметры поверхностного слоя (наклеп и остаточные напряжения)

2.4 шероховатость поверхности

2.5 усталостные испытания

2.6 определение механических свойств материала

2.7 межкристаллическая коррозия

5.13 Специальные виды контроля

- Магнитный контроль.

Используется для контроля внутренних дефектов материала. Сущность метода – регистрация магнитных полей рассеяния, которое возникает над внутренними дефектами детали при ее намагничивании. При этом в дефектоскопе во взвешенном состоянии находятся ферромагнитные

частички, которые осаждаются на детали в том месте, где имеется дефект в сплошности материала (деталь надо размагничивать)

- Ультразвуковой контроль

Направлен на определение внутренних дефектов в материале. Сущность – в деталь с помощью специальных датчиков направляются волны (акустические), колеблющиеся с частотой 0,5…1,0 МГц. Если в металле есть дефект, то упругие волны от него отражаются и это регистрируется на показывающем приборе.

- Рентген-контроль (радиационная дефектоскопия)

Сущность – регистрация ионизирующего излучения, проходящего через деталь на специальной пленке. В случае если имеет место дефект в материале, на пленке будет ослабление пучка, что регистрируется на рентгенограмме.

- Люм-контроль (капиллярная дефектоскопия)

Применяется для выявления поверхностных дефектов, а именно микротрещин. Позволяет обнаружить микротрещины, раскрытость которых от 0,002мм и глубиной от 0,02мм. Сущность – на контролируемую поверхность наносится жидкость (пенетрант), она либо имеет характерный цветовой тон, либо она люминесцирует под действием ультрафиолетового излучения. В случае наличия микротрещин под действием капиллярного эффекта жидкость затекает в трещину. Деталь промывается, наносится жидкость-проявитель, которая вытягивает пенетрант на поверхность. Под действием ультрафиолета этот след проявляется.

5.14 Влияние точности контроля на качество продукции

Точность работы технологической системы (ТС) оказывает влияние на вероятность выхода дефектной продукции.

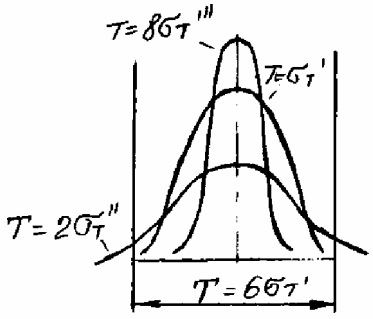


Рисунок 5.5

T/σ_T	0	1	2	3	4	5	6	7	8
доля брака	1	0,617	0,317	0,134	0,046	0,012	0,0027	0,0004	0,00006

Сам процесс контроля носит вероятностный характер, т.е. контрольно-измерительные системы имеют определенную погрешность измерения. Когда истинное значение контролируемого параметра приближается к границе поля допуска, то всегда существует вероятность того, что при измерении годная деталь будет объявлена бракованной, и наоборот, бракованная – годной.

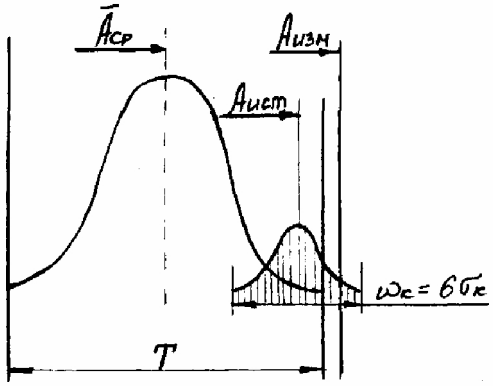


Рисунок 5.6 – Влияние погрешностей измерения на качество контроля

Для исключения негативных моментов, связанных с точностью работы контролирующей измерительной системы, предлагаются решения:

1. погрешность контрольно-измерительной оснастки не должна превышать $\omega_к = (0{,}08...0{,}33)T$; где Т – допуск на контролируемый; размер

2. рекомендуется проводить статический контроль качества при измерении.

Доля неправильно принятой и неправильно забракованной продукции зависит как от точности работы технологической системы ($\sigma_т$), так и от точности контрольной системы ($\sigma_к$).

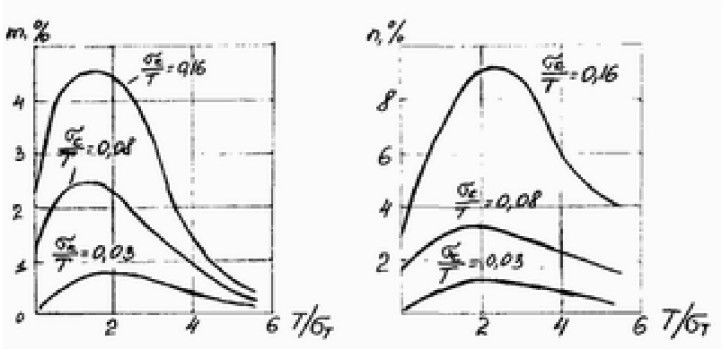


Рисунок 5.7 – Доля неправильно принятой бракованной продукции (m) и неправильно забракованной годной продукции (n) в зависимости от точности ТС и контроля и обработки

m – доля неправильно принятой бракованной продукции в зависимости от точности ТС контроля и обработки.

n – доля неправильно забракованной годной продукции в зависимости от точности ТС изготовления и контроля .

Для снижения этого неприятного факта рекомендуется перепроверка деталей в службе ОТК.

Таблица 5.2 - Результаты перепроверок в ОТК

Вид требований КД	Достоверность контроля, %
Неплоскостность и прилегание по краске	99
Биение, неперпендикулярность, отклонение от номинального положения	83
Контроль линейных размеров 1.отливка 2.механическая обработка	 77 96
Шероховатость	95
Сортировка по группам резьб	100
Дефекты гальванопокрытий	100

6. НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Надежность и работоспособность выпускаемой продукции во многом определяется возможностью реализуемой технологии. Надежность ТП можно рассматривать с различных позиций:

1. С точки зрения обеспечения качества выпускаемой продукции
2. С точки зрения производительности
3. С точки зрения затрачиваемых ресурсов (материалы, энергия, исполнители)
4. С точки зрения техники безопасности

Общие требования, методы и порядки оценки ТС регламентированы ГОСТ 27.203-83.

Оценки надежности ТС осуществляются на стадии проектирования технологии, когда производится выбор оборудования, оснастки, режимов обработки, а также на этапе ее эксплуатации с целью оптимизации и поддержания необходимого уровня надежности.

В оценку надежности действующих ТС входят:

- Определение фактических показателей ТС
- Проверка выполнения требования нормативов по надежности.

Результаты оценки используются для:

- Нормирования показателей надежности
- Разработка мероприятий по повышению надежности
- Оптимизация методов обслуживания ТС и средств их оснащения
- Выбор оптимального варианта при проектировании ТП
- Оптимизация режимов обработки
- Выбор средств технического оснащения
- Определение периодичности смены инструмента
- Установление причин отказов ТС и путей их предотвращения

В зависимости от цели и вида ТС показатели надежности могут определяться:

- для одного цикла ТС

- на период изготовления партии деталей

- на все время выполнения установленной производственной программы

При комплексной оценке надежности ТС критерии, определяющие работоспособность системы, разделяются на три группы, которые характерезуют:

- качество изготовления (Q – критерий): параметры ТП, которые регламентированы технической документацией и показатели качества продукции.

- Производительность обработки (R – критерий): объем выпуска, продолжительность изготовления детали или партии, длительность цикла.

- Критерий затрачиваемых ресурсов (С – критерий): количество исполнителей, израсходованных инструментов и материалов, стоимость технического обслуживания.

Метод оценки надежности ТС выбирается в соответствии указанным критерием.

Так, по Q – критерию отказами служат выход одного из показателей качества продукции за допуск или выход режимов обработки за предельно допустимое значение.

По R – критерию отказом считается невыполнение установленного объема производства в заданный срок, остановка системы по причине выхода из строя какого-то элемента, превышение норм простоя ТС при техническом обслуживании и снижение ритма выпуска продукции.

По С – критерию отказом считается превышение себестоимости продукции против плановой из-за брака (стоимость брака переходит в стоимость продукции), превышение норм расхода материала, инструментов, энергетических ресурсов, численности работников.

6.1 Условия работоспособности ТС

Состояние ТС считается работоспособным, если одновременно выполняются условия:

$$S(t) \in \widetilde{S} \Rightarrow \begin{Bmatrix} Q(t) \in \widetilde{Q} \\ R(t) \in \widetilde{R} \\ C(t) \in \widetilde{C} \end{Bmatrix}$$

S – состояние ТС

$\in$ - принадлежность

Q, R, C – значение параметров качества, производительности и затрат ресурсов по момент t.

$\widetilde{Q}, \widetilde{R}, \widetilde{C}$ - множество допустимых значений параметров, при которых ТС работоспособна.

Условием безотказности ТС по j-ому параметру за наработку Т является выполнение следующего условия:

$$E_{ij} \le Y_j(t) \le E_{sj} \quad \text{для } t \in (0, T)$$

E_{ij} и E_{sj} – нижние и верхние пределы отклонения для j-ого параметра, определенного по нормативам.

$Y_j(t)$ – значение j-ого параметра в момент времени t.

Т – время или цикл функционирования или единица производимой продукции.

Вероятность выполнения ТС задания по различным m параметрам есть следующая:

$$P_{1\ldots m}(t) = P\{E_{i1} \le Y_1(t) \le E_{s1} \ldots E_{im} \le Y_m(t) \le E_{sm}\}$$

Контроль оказывает значительное влияние на надежность функционирования ТС, при этом вероятность выполнения задания ТС по

j-ому параметру качества при наличии контрольных операций в ТС определяется:

$$P_{kj}(t) = 1 - \left[1 - P_j(t)\right] \cdot \beta_j \cdot (t)$$

β - риск потребителя по j-ому параметру качества.

Пример: пусть $\begin{matrix} P_j(t) = 0.8 \\ \beta_j(t) = 0.1 \end{matrix}$, тогда $P_{kj} = 0.9$ - вероятность выявления брака при контроле.

Если в ТП предусмотрены несколько различных контрольных операций, каждая из которых имеет свое значение P_{kj} при условии их взаимной независимости, то вероятность выполнения задания ТС по j-ому параметру качества будет:

$$P_{kj}(t) = 1 - \left[1 - P_j(t)\right] \cdot \prod_{i=1}^{q} \beta_{ij}(t)$$

Пример: P_j=0.8; β_1=0.1; β_2=0.2 =>P_{kj}=0.996

В тех случаях, когда контролю подвергаются m независимых параметров качества и значения по каждому равны $\beta_1, \beta_2, \beta_m$, то вероятность безотказной работы ТС есть произведение

$$P_k(t) = \prod_{j=1}^{m} \left\{1 - \left[1 - P_j(t)\right]\beta_j(t)\right\}$$

6.2 Надежность ТС по параметрам производительности (R – критериям)

При расчете надежности ТС по R – критерию используются методы теории массового обслуживания. В начале исходных данных должны быть заданы:

- Структура системы (число рабочих мест, средства их обеспечения при работе, наличие накопителей, количество резервных элементов).

- Дисциплина поступления и обслуживания заявок (заготовки на рабочие места, детали и узлы на сборку).

- Продолжительность технического обслуживания (наладка оборудования, плановые ремонты).

- Установка времени и сроков выполнения задания, а также ритм выпуска продукции.

Методы оценки надежности должны предусматривать возможность определения показателей, которые характеризовали бы способность ТС:

а) Выполнение задания определенного объема в течении времени t.

б) Выполнение задания длительностью t_o в течении времени t $(t_0 \le t)$.

Первое условие выражается через вероятность выполнения условия ТС следующим образом:

$$P_R = P\{V_1(t) \ge V_{01}, ..V_i(t) \ge V_{0i}, ...V_m(t) \ge V_{om}\}$$

$V_i(t)$ – количество продукции i-ого наименования, изготовленного за время t.

V_{oi} – заданное количество продукции (план).

Второе условие выражается через вероятность:

$$P_R = \prod_{i=1}^{m} [P\{V_i(t) \ge V_{oi}\}](1 - a_i)$$

a_i - риск поставщика на продукцию i-ого наименования.

6.3 Методы оценки надежности Тс по параметрам качества (по Q-критерию)

Оценка надежности ТС по Q – критерию должна проводиться в случаях:

1. При проектировании ТП на стадии технологической подготовки производства.

2. При изготовлении ТП и определении периодичности подналадок оборудования.

3. При выборе методов и планов статического регулирования ТП и его операций.

4. При выборе и корректировании планов контроля готовой продукции.

5. При замене, модернизации или ремонте средств технического оснащения.

6. При совершенствовании ТП в плане повышения его надежности и качества выпускаемой продукции.

Исходными данными являются:

- Требуемые или базовые показатели (значения) надежности
- Состав ТС
- Вид выпускаемой продукции и длительность технического цикла
- Программа выпуска или объем производства
- Точностные характеристики заготовок
- Предельно допустимые значения выпускаемой продукции
- Данные о нарушении технической дисциплины
- Точностные характеристики применения методов обработки и средств контроля
- Результаты предшествующих оценок

При выборе методов оценки надежности ТС по Q – критерию необходимо различать следующие уровни рассматривания ТС:

1. ТС операции
2. ТС технического процесса
3. ТС, действующий в пределах производства подразделения
4. ТС предприятия

В зависимости от вида ТС (уровня) все показатели надежности подразделяются на следующие группы:

1. по точности ТП и средств оснащения
2. по технологической дисциплине
3. по выполнению заданий по качеству
4. комплексные показатели

Таблица 6.1 – Группы показателей надежности в зависимости от уровня технологической системы

Вид ТС	Группа показателей надежности			
	по точности	по технологической дисциплине	по качеству	комплексные
ТС операции	+	-	+	-
ТС ТП	+	+	+	+
ТС подразделения	-	+	+	+
ТС предприятия	-	+	+	+

Для оценки показателей надежности по Q – критерию в зависимости от вида ТС и целей оценки могут использоваться следующие методы:

1. Расчетные методы
2. Опытно-статистические
3. Регистрационные
4. Экспертные
5. Метод квалитетов

Расчетные методы основаны на следующем:

- Использование математических моделей изменения параметров качества или параметров ТП с учетом физических явлений, приводящих к отказам (износ инструмента, температурные и упругие деффиренциации)

- Использование данных о закономерностях изменения во времени различных, перечисленных выше, факторов, влияющих на параметры качества продукции

Опытно-статистические методы могут основываться на использовании данных измерений параметров качества, которые получаются в результате

специально выборочного обследования ТС, а также в результате специальных испытаний элементов ТС.

Регистрационные методы основываются на данных контрольной службы

Экспертные методы основываются на информации, полученной от экспертов.

Методы квалитетов основываются на сравнении требуемых значений параметров ТС с их предельно возможными значениями, оговоренных в нормативно-технической документации в зависимости от квалитета точности оборудования, оснастки, метода обработки и квалитета точности выпускаемой продукции.

6.4 Методы оценки надежности ТС по параметру точности

Целью данной оценки является:

- Определение возможности применения рассматриваемого ТП для выпуска продукции с определенными параметрами качества.
- Для оценки изменения точностных характеристик ТС во времени и определение их соответствия требованиям нормативно-технической документации.
- Для получения информации с целью регулирования ТП или операций ТП.

В процессе анализа точности определяют или уточняют следующее:

1. Модели формирования погрешностей обработки
2. Модели изменения точности ТС во времени
3. Зависимости между точностными характеристиками продукции и параметрами ТС
4. Зависимости между погрешностями обработки на различных операциях ТП
5. Основные факторы, изменяющие точностные характеристики ТС
6. Пути и средства повышения точности ТС в процессе эксплуатации
7. Оптимальная стратегия технического обслуживания и ремонта средств технического оснащения.

Контроль точности ТС производится по альтернативному или количественному признакам. В первом случае проверяют соответствие параметров тех процессов и средств технологического оснащения требованиям нормативно-технической документации. Обычно это выполняется на этапе проектирования технологии и технологической подготовки производства (метод квалитетов). Во втором случае определяется ряд коэффициентов, к которым относятся: коэффициент точности, коэффициент мгновенного рассеивания по контрольному параметру, коэффициент смешения, коэффициент запаса точности.

- Коэффициент точности по контрольному параметру

$K_T = \frac{\omega}{T}$, где $\omega = l(\varphi) \cdot \sigma$, где $l(\varphi)$ - коэффициент зависящий от закона распределения контрольного параметра.

σ - среднеквадратичное отклонение параметра.

Для закона Гаусса: $l(\varphi) = 6$

Для закона равной вероятности: $l(\varphi) = 2\sqrt{3}$

Для закона Симпсона: $l(\varphi) = 2\sqrt{6}$

Для закона Максвелла: $l(\varphi) = 5{,}25$

- Коэффициент мгновенного рассеивания по контрольному параметру

$K_p(t) = \frac{\omega(t)}{T}$, где $\omega(t)$ - поле рассеяния параметра в момент времени t или в выборке.

- Коэффициент смещения контрольного параметра

$$K_c = \frac{\overline{\Delta}(t)}{T}$$

$\overline{\Delta}(t)$ - среднее значение отклонения контрольного параметра относительно поля допуска в момент времени t (в выборке).

$\overline{\Delta}(t) = \left|\overline{X}(t) - X_o\right|$

$\overline{X}(t)$ - среднее значение контрольного параметра в выборке

X_o – значение параметра соответствующее середине поля допуска

- Коэффициент запаса точности

$K_з(t) = 0.5 - K_c(t) - 0.5K_p(t)$

Вывод: ТС считается надежной, если выполняются следующие условия:

$К_т<1$, а $К_з(t)>0$

Если хотя бы один из параметров не выполняется, то ТС не надежна.

6.5 Оценка выполнения заданий в плане надежности ТС по нарушению технической дисциплины

Целью данной оценки является определение уровня технологической дисциплины, и характер ее изменения во времени. Она проводится при выборе методов и планов статистического регулирования технического процесса, а также планов технического контроля продукции.

Число объектов контроля по технической дисциплине состоит из ТП, в котором отмечается появление брака и особо ответственных ТП (диски, валы, лопатки).

6.6 Оценка по параметрам качества продукции

Цель оценки – определение вероятности того, что ТС обеспечит изготовление продукции в соответствии с требованиями документации. Оценке подвергаются те операции и ТП, которые оказывают решающее влияние на качество готовой продукции.

Для оценки используют показатели:

1. Вероятность выполнения задания по j-ому параметру качества продукции.

2. Вероятность выполнения задания по m параметрам качества.

Эти показатели определяются расчетным, опытно-статистическим и регистрационными методами.

6.7 Оценка по комплексным показателям

По комплексным показателям оцениваются как отдельные ТП, так и ТС подразделения и предприятия. При этом оценку осуществляют по критериям брака и возврата продукции. К показателям возврата продукции относятся: процент сдачи продукта с первого предъявления, вероятность соблюдения нормативов по бракам и возвратам.

7. КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ

7.1 Теоретическая и техническая прочность материалов

Теоретическая прочность материала определяется из условия разрушения идеальной кристаллической решетки монокристалла, в котором действию разрушающих сил противостоят атомные связи. Она определяется как максимальное напряжение, которое необходимо приложить для разъединения монокристалла на две части с разделением двух атомных плоскостей.

$$\sigma_{\max} = \left(\frac{E \cdot U_s}{r_0} \right)^{\frac{1}{2}}$$

E – модуль упругости;

U_s – поверхностная энергия;

r_0 – межатомное расстояние;

$F_e \rightarrow \sigma^T{}_{\max} = 7000$ МПа

$\sigma_{\max}{}^{реал} = 300$ МПа

Несоответствие между теоретической и фактической прочностью есть результат отличия кристаллической решетки идеального металла от реального металла. В реальном материале в кристаллической решетке имеет место дефекты (несовершенства). К ним относят точечные дефекты (вакансии), замещающие атомы (в узлах) линейных дефектов и поверхностных дефектов.

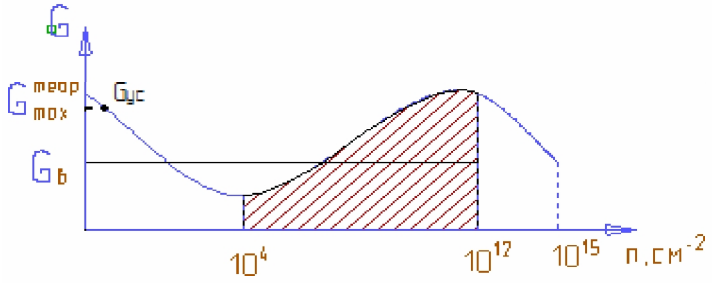


Рисунок 7.1 – Влияние числа числа несовершенств кристаллической решетки (n) на прочность материала

$У_С$ - специально выращиваемый нитевидный монокристалл, прочность которого выше прочности обычного металла в 10-20 раз.

На участке $10^4...10^{12}$ имеет место упрочнение материала по мере роста числа дефектов 10^{15} - это предельная область дислокации, при котором материал разрушается.

Любое разрушение металла есть результат пластичной деформации, а ее основе лежат необратимые перемещения дефектов кристаллической решетке. Пластичная деформация имеет двойственную природу: с одной стороны она ведет к упрочнению металла, а с другой стороны она подготавливает условия для его разрушения. Известно, что несовершенство структуры материала готовой детали зависит от предыстории получения металла и от технологии его обработки. Чтобы две одинаковые детали имели бы одинаковые эксплуатационные характеристики мало их выполнить из одного металла, но еще необходимо обеспечить одинаковость ТП обработки (резания, СОЖ и другие).

7.2 Причины, обусловливающие связь технологии изготовления с прочностью деталей

В современных машинах, например энергетических установках, детали работают в условиях высоких и быстроменяющихся температур, агрессивных сред; одновременно материал деталей подвержен воздействию высоких статических и динамических напряжений, амплитуда и частота которых изменяются в широких пределах. Тепловой удар приводит к возникновению дополнительных термических напряжений. Воздействие температуры, напряжений и агрессивной среды приводят к появлению различных дефектов на поверхности.

Дефекты (разрушение материала вследствие потери жаропрочности, накопление дефектов структуры и развитие трещин усталости, коррозия, термоусталость, разрушение при контактном взаимодействии деталей, изменение структуры и физико-механических свойств, различного рода

«повреждаемость» металла и др.) в подавляющем большинстве случаев наблюдаются в тонком приповерхностном слое деталей.

Таким образом, с одной стороны, разрушение детали начинается с поверхности, с другой - эта поверхность формируется при реализации той или иной технологии. В результате закономерно ожидание тесной взаимосвязи между технологией обработки деталей и их прочностью и долговечностью в процессе эксплуатации. Причин, обусловливающих связь между свойствами поверхности и эксплуатационными свойствами деталей, несколько. Главные из них следующие:

1. При всех основных способах нагружения поверхностный слой деталей оказывается более нагруженным, чем сердцевина. Примером могут служить чистый изгиб, поперечный изгиб, кручение, вдавливание и др. Даже при растяжении (сжатии) в поверхностном слое имеют место более благоприятные условия для пластического течения и разрушения по сравнению с сердцевиной, поскольку здесь имеют место неуравновешенные атомные связи, облегчен выход дислокаций и вакансий на поверхность, меньше требуется энергии для генерирования дислокаций источниками. В этом случае разупрочняющее действие на металл поверхностного слоя оказывают также экструзия и энтрузия. Из данных, приведенных на рис. 7.2, следует, что при действии изгибающего момента М поверхностные слои детали с точки зрения напряженности оказываются в самых неблагоприятных условиях. Рабочие напряжения $\sigma_{раб}$ складываются с технологическими остаточными макронапряжениями $\sigma_{ост}$; это приводит к резкому возрастанию результирующих напряжений $\sigma_{рез}$, действующих в процессе эксплуатации детали. В случае действия знакопеременных нагрузок технологические напряжения приводят к существенной асимметрии цикла, что, как известно, также отрицательно сказывается на работоспособности детали. Таким образом, с позиций прочности детали оказывает небезразличным то, какая будет применена технология обработки детали, обусловливающая напряженное состояние металла поверхностного слоя.

2. Обработка деталей формирует определенный, свойственный каждому методу обработки свой макро-, микро-субмикрорельеф обработанной поверхности (рис. 7.3).

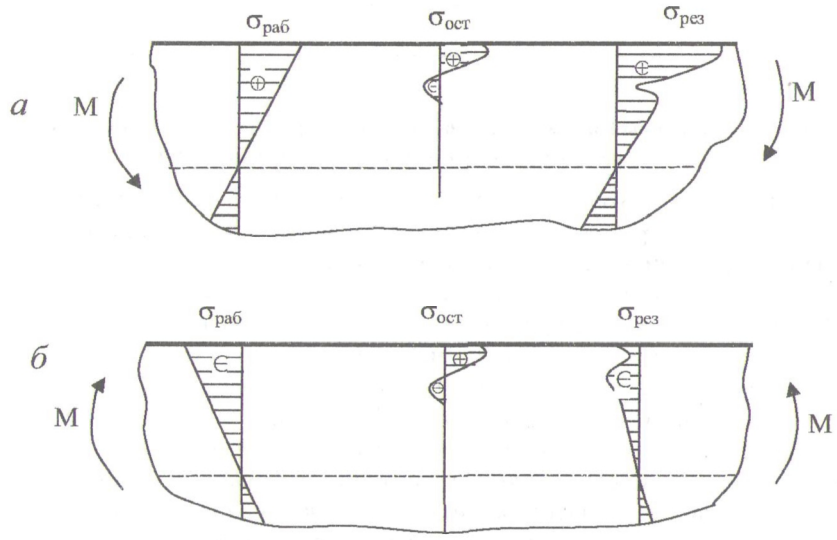


Рисунок 7.2 - Влияние остаточных технологических напряжений на результирующие напряжения, действующие при эксплуатации детали:

а - полуцикл растяжения, б - полуцикл сжатия

Риски и неровности на обработанной поверхности являются своего рода концентраторами напряжений - очагами образования и развития трещин, особенно трещин усталости. В современной практике производится расчет не только амплитуды соответствующей гармоники профиля, но и «условного» коэффициента концентрации напряжений

$$a_n = \frac{A_n}{B_n}$$

где А у - амплитуда; В $_{п}$ - шаг соответствующей гармоники.

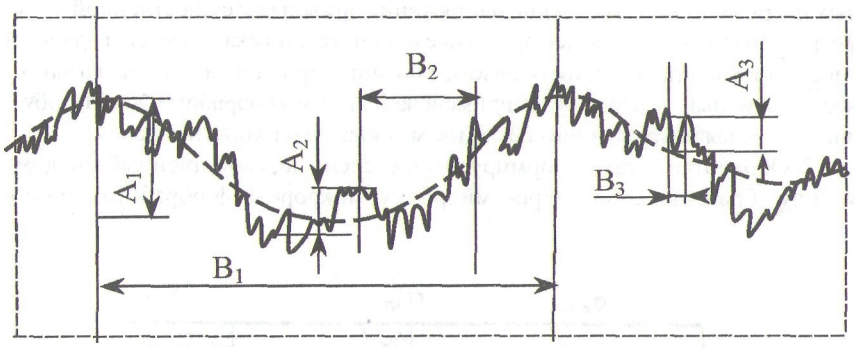


Рисунок 7.3 - Реальный профиль обработанной поверхности, характеризуемый амплитудой *A* и шагом *B* соответствующей гармоники

3. Известно, что образование трещины в идеальной по своему строению кристаллической решетке невозможно. Разрушение такого кристалла происходит с одновременным разрушением всех атомных связей по всему сечению без пластической деформации и без образования и развития трещин. Прочность в этом случае приближается к теоретической прочности, которая, как известно, в десятки раз выше прочности реального металла. Для образования трещины в реальном металле необходима пластическая деформация, которая при плотности несовершенств (дефектов) кристаллической решетки критической величины приводит к образованию незалечивающихся трещин. Всем известна ответственность пластической деформации за возникновение микротрещин. Суть вопроса состоит в том, что на самых ранних стадиях пластического деформирования взаимодействие дислокаций приводит к образованию микротрещин атомного масштаба. И как показывают исследования, уже при степенях деформации порядка $6 \div 8\%$ в металле возникают незалечивающиеся микротрещины, причем коэффициент сопротивления их распространению при превышении указанных степеней деформации резко падает (рис. 7.4).

Технология механической обработки предусматривает изготовление детали путем срезания тонких слоев металла с заготовки; при этом срезание осуществляется путем пластической деформации и разрушения определенного слоя. Однако интенсивной деформации подвергается не только стружка, но и некоторый слой металла, лежащий ниже линии среза,

образующий поверхность детали. В результате новая, только что изготовленная деталь в тонком приповерхностном слое уже имеет очаги разрушения в виде субмикротрещин. Отсюда становится ясной связь между технологией изготовления и эксплуатационными свойствами деталей.

На рис. 7.4 в качестве примера показано образование при пластической деформации субмикротрещин в области пересекающихся систем скольжения и в области препятствия в виде границы зерна.

Все вышеизложенное в равной степени относится и к большому числу технологий деформационного упрочнения - алмазному выглаживанию и обкатке роликами, гидрогалтованию и упрочнению микрошариками, упрочнению

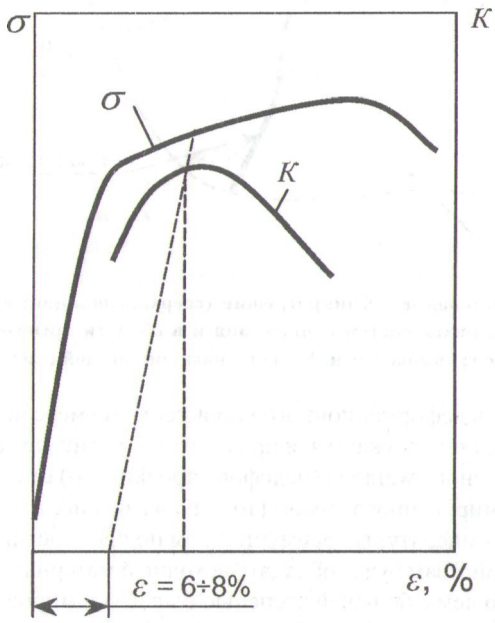


Рисунок 7.4 - Кривая растяжения стали и изменение коэффициента сопротивления распространению трещины в зависимости от степени деформации при растяжении

взрывом и виброгалтованию, ультрозвуковому упрочнению и раскатыванию и др. Все эти методы и процессы основаны на способности металлических материалов к упрочнению (повышению характеристик прочности, в том числе и твердости) при их пластической деформации. Во многих случаях удается сформировать в поверхностном слое благоприятные

сжимающие остаточные напряжения и существенно повысить класс шероховатости поверхности. И то и другое приводит к повышению эксплуатационных свойств (надежности и долговечности), хотя установлено, что пластические свойства металла при этом снижаются.

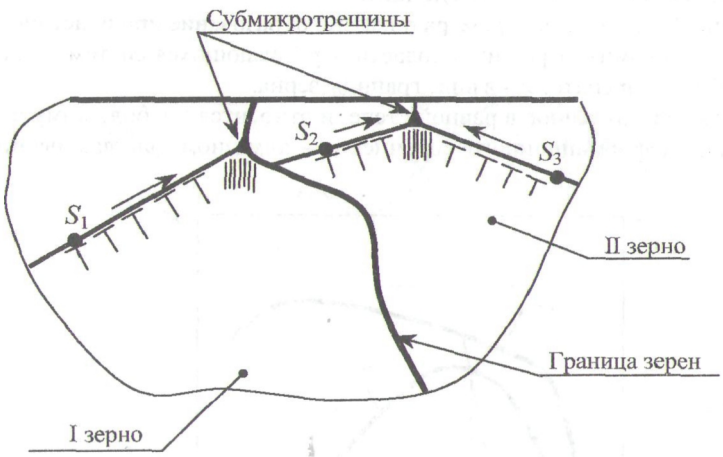


Рисунок 7.5 - Образование субмикротрещин (сверхдислокаций) в области

пересекающихся систем скольжения и в области препятствия в виде границы зерен; S - источники дислокаций (схема)

Эффективность деформационного упрочнения по мере повышения температуры эксплуатации снижается, и при некоторой критической температуре прочность исходного металла (недеформированного) становится равной прочности деформированного сплава (точки *а и в* на рис. 7.5). При дальнейшем повышении температуры преимуществом по прочностным, пластическим и упругим свойствам будет обладать исходный материал. При этом следует отметить, что чем с большей степенью был деформирован металл, тем при более низких температурах наблюдается указанное условие равнопрочпости. В общем виде такое влияние степени пластической деформации ε и температуры испытания θ на характеристику прочности $\sigma_в$ металла

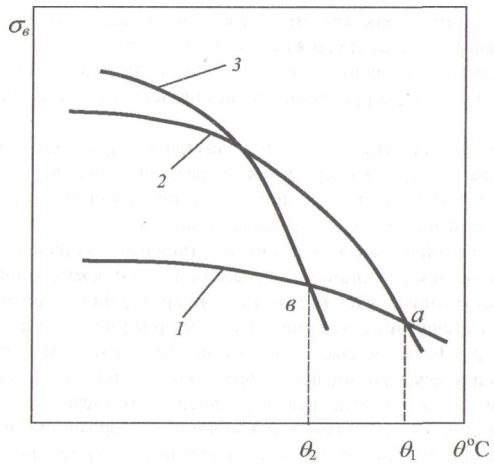


Рисунок 7.6 - К вопросу о влиянии пластической деформации на прочность металла

(пояснения в тексте)

схематично показано на рис. 7.6. Здесь кривая *1* показывает изменение $\sigma_в$ от температуры для недеформированного сплава; кривые *2* и *3* — для деформированного материала со степенями деформации ε_1 и ε_2, причем $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$. Видно, что даже при кратковременных испытаниях с позиции получения наибольшей прочности имеют место ограничения как по степени пластической деформации, так и по температуре эксплуатации.

Выше уже указывалось, что для образования трещины (а, следовательно, и разрушения) необходима пластическая деформация. В то же время известно, что такие наиболее часто встречающиеся виды разрушения как усталостное, вязкое разрушение происходят, минуя три стадии - упрочнение, повреждение и разрушение. Все эти стадии, так или иначе, связаны с явлениями упругой, упругопластической деформации. С другой стороны, и вышеперечисленные технологии также основаны на пластической деформации. В связи с этим уместно заметить, что при реализации технологии необходимо строго контролировать зоны и интенсивность деформации материала с тем, чтобы на этапе эксплуатации детали обладали достаточно высоким запасом ресурса пластичности.

4. Технологии на всех этапах изготовления деталей (а на финишных тем более) существенно меняют структуру, физико-механические, химические, термические, электрические, магнитные свойства, на несколько порядков увеличивается диффузионная подвижность атомов и др. С другой стороны, в процессе эксплуатации поверхности деталей подвержены воздействию внешней среды - тепловому, коррозионному, механическому, эрозионно-кавитационному.

Различные компоненты топлива, окислителя, продукты сгорания, морской климат и пр. приводят к коррозионному разрушению поверхности деталей и узлов. Следует отметить, что при эксплуатации машин воздействие агрессивной среды в чистом виде встречается крайне редко. Всегда имеет место и механическое воздействие вследствие действия рабочих напряжений. Поэтому в подавляющем большинстве случаев встречаются коррозионно-механические дефекты (повреждения): это такие повреждения, которые возникают под влиянием коррозии и механических факторов (напряжений, деформаций, трения и др.). Влияние каждого из этих факторов в общем процессе коррозионно-механического разрушения металла поверхностного слоя изменяется в широких пределах и существенно зависит от температуры эксплуатации. Наиболее типичными видами коррозионного и коррозионно-механического повреждения поверхности являются окисление, межкристаллитная и питинговая

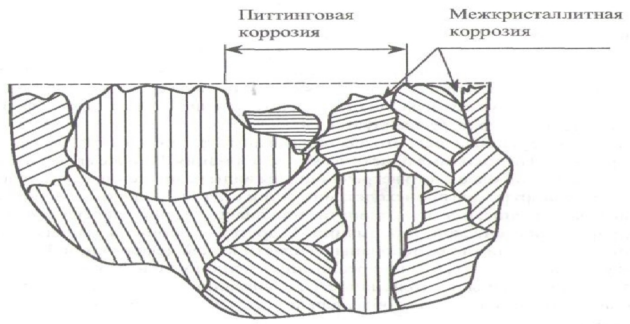


Рисунок 7.7 - Поверхностная коррозионно-механическая повреждаемость (показано схематично в нормальном сечении по отношению к поверхности)

коррозия, коррозионная усталость, коррозионное растрескивание и коррозия при трении.

Коррозионная усталость представляет собой процесс разрушения металла поверхностного слоя при одновременном действии коррозионной среды и переменных напряжений. Коррозионный фактор значительно усиливает развитие субмикро- и микротрещин, возникающих по границам зерен и в самом теле «слабых» зерен. Вследствие коррозии на поверхности детали часто образуется макро- и микроскопический питтинг (локальное коррозионное разрушение отдельных зерен или группы зерен на поверхности детали), который является концентратором напряжения и служит причиной образования сетки микротрещин (поверхностная коррозионно-механическая повреждаемость). На рис. 7.8 схематично показан такой вид разрушения поверхности. Питтинговая коррозия возникает вследствие окисления «слабых» зерен («слабыми» зернами являются такие зерна, которые ориентированы в пространстве так, что их коррозионная стойкость наименьшая). Межкристаллитная коррозия проявляется в более интенсивном окислении металла в области границ зерен.

Коррозионное растрескивание возникает под действием статических напряжений и агрессивной среды.

Коррозия при трении (фреттинг-коррозия) - это вид разрушения металла, возникающего при одновременном действии агрессивной среды и относительном перемещении деталей в контакте. Процесс разрушения поверхности трения обычно протекает при колебательном движении контактирующих поверхностей с малой амплитудой. Практика эксплуатации изделий показывает, что даже при прессовой или горячей посадке деталей, при которых, казалось бы, относительных перемещений нет, посадочные места подвергаются фреттинг-коррозии. Механизм фреттинг-коррозии представляется как процесс периодического разрушения образующейся окисной пленки в точках контакта деталей.

Применительно к ГТД и энергетическим установкам характерными примерами фреттинг-коррозионного разрушения деталей являются поверхности контакта замков лопаток компрессора и турбины и соответствующих поверхностей на дисках (рис. 7.8).

Эрозионно-кавитационное разрушение металла поверхностного слоя деталей машин возникает при действии на металл потоков жидкости или газа, движущихся с большой скоростью. Разрушение поверхности возникает при определенных условиях взаимодействия потока жидкости или газа с поверхностью детали. Кавитация возникает в тех зонах, где нарушается сплошность потока жидкости. Образующиеся кавитационные пузыри, находясь у поверхности детали, сокращаются, а впоследствии разрушаются, что приводит к гидравлическому удару среды о поверхность металла. Механизм разрушения в

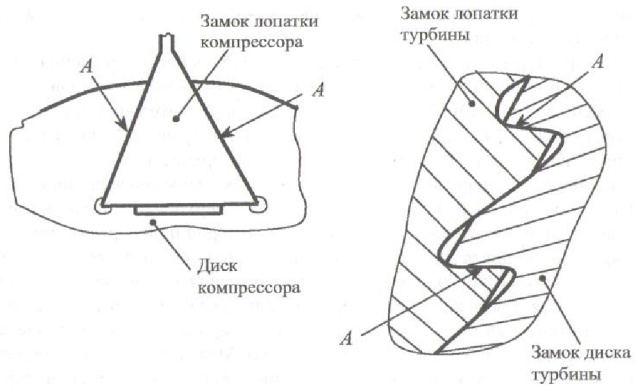


Рисунок 7.8 - Участки замков лопаток и дисков компрессора и турбины (зоны *A)*, где протекает процесс фреттинг-коррозии

этом случае заключается в непрерывном разрушении и удалении окисных пленок с поверхности деталей.

Из сказанного следует, что с точки зрения сопротивления коррозионно-механическому разрушению не безразлично, какая технология на финишном этапе применена, ибо последняя определяет не только прочностные и пластические свойства металла поверхностного слоя, но и его химический и структурно-фазовый состав, электрический потенциал, диффузионную

подвижность атомов, экзоэлектрическую эмиссию, термодинамическую стабильность и др.

5. Многие детали машин для повышения эксплуатационных свойств изготовляются с различного рода защитными покрытиями - газо-плазменными, вакуумно-плазменными, детонационными, гальваническими и др. Опыт нанесения покрытий и эксплуатация деталей с покрытиями показал, что работоспособность таких деталей зависит не только и не столько от собственно покрытий, сколько от комплекса «покрытие-подложка». Весьма важно для получения качественного покрытия (по геометрическим параметрам, структуре, адгезии, внутренним напряжениям, диффузионной подвижности атомов и др.) по соответствующей технологии получить необходимые свойства подложки (по микрогеометрии поверхности, наклепу, внутренним остаточным напряжениям, структуре и др.). Из сказанного следует, что надежность и долговечность деталей машин определяется технологией на всех этапах их изготовления.

6. Опыт проектирования, производства, эксплуатации и ремонта деталей показывает, что свойства материала деталей, и особенно некоторого приповерхностного слоя, не остаются постоянными, как на этапах технологии, так и при эксплуатации. При реализации технологии изменения протекают под воздействием технологических факторов, при работе в изделии под воздействием эксплуатационных условий - нагрузок, температур, агрессивных сред и т.д. Ясно, что прогноз о работоспособности детали после определенного срока эксплуатации возможен на основании знаний закономерностей процессов релаксации и разупрочнения материала и в первую очередь в поверхностном слое. Вопрос часто стоит так: в течение какого ресурса машины можно получить положительный эффект от применения какой-либо упрочняющей (или защитной) технологии? Ответ на этот вопрос могут дать только конкретные закономерности процессов разупрочнения. Многочисленные исследования и натурные испытания показывают, что скорость релаксации свойств в поверхностном слое и его

разупрочнение находятся в тесной корреляционной связи с исходными, технологией изготовления определяемыми, свойствами поверхности. Из сказанного следует, что от технологии зависят не только начальные свойства детали, но и ее свойства на каждом этапе эксплуатации.

В качестве примера на рис 7.9 представлено представлено изменение шероховатости лопаток турбин по времени наработки.

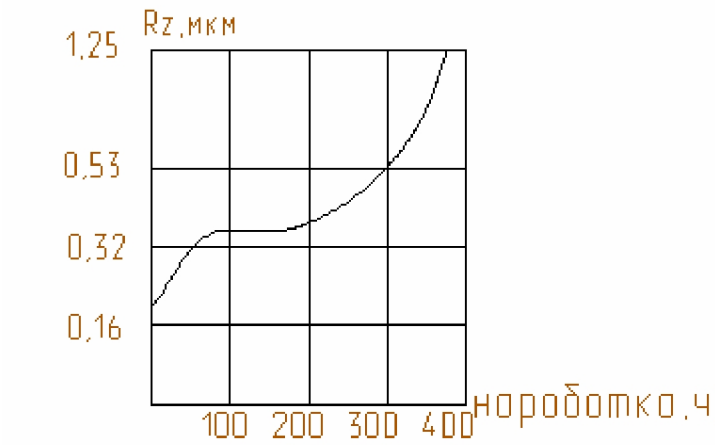


Рисунок 7.9 – Изменение шероховатости поверхности лопаток турбины из материала ХН70ВМЮГ во времени наработки при температуре 500°С

Исходная шероховатость (Ra), задаваемая конструктором, составляет:

Лопатка Т

- замок 1,25…1,0 мкм

- перо 0,32…0,25 мкм

Лопатка. К

- замок 1,25…1,0 мкм

- перо 0,63…0,5 мкм.

Применительно к лопаткам К повышение шероховатости при эксплуатации по сравнению с исходной происходит на 2-3 класса. Для

обеспечения эксплуатационных свойств необходимо управлять несущей способностью поверхностного слоя.

В процессе эксплуатации приповерхностные объемы материала испытывают наибольшие нагрузки, контактируя с сопряженными деталями и потоками частиц, непосредственно взаимодействуя с внешней средой, поэтому структурно-фазовое состояние, химический состав поверхностного слоя и его микрогеометрия определяют работоспособность и ресурс многих ответственных деталей.

Поверхностный слой, толщина которого находится в пределах от десятков ангстрем до десятых долей миллиметра, характеризуется структурой и свойствами, отличными от основного материала. Это обусловлено тремя основными причинами:

особым состоянием атомов на поверхности (наличие свободных связей) и как следствие свободной поверхностной энергией и большой адсорбционной активностью;

измененными в результате технологического воздействия структурой, фазовым и химическим составом;

повторными механическими, тепловыми и физико-химическими воздействиями в процессе эксплуатации.

Несущая способность поверхностного слоя - комплексное понятие, характеризующее сопротивление поверхности и приповерхностных объемов материала внешним факторам. Например, несущая способность при контактном нагружении зависит от сопротивляемости поверхностного слоя статическим и динамическим воздействиям, усталостным процессам, абразивному разрушению, схватыванию и т.д. Исходными данными для ее оценки являются твердость, шероховатость, толщина упрочненного слоя, уровень и знак остаточных напряжений, свойства материалов сопряженных деталей.

Процессы, протекающие в поверхностном слое при эксплуатации, зависят от его состояния после технологической обработки, условий нагружения, механики и физико-химических особенностей контактного взаимодействия.

Взаимосвязи перечисленных факторов образуют сложную динамическую систему, в которой изменение состояния поверхностного слоя в процессе эксплуатации влечет изменение условий нагружения (рис. 7.10).

В частности, приработка рабочих поверхностей и формирование на них вторичных структур приводят к снижению коэффициента трения, что уменьшает и изменяет характер действующих нагрузок

Рисунок 7.10. Структура динамической системы поверхностный слой - условия нагружения

Как и любая другая динамическая система, она может находиться в состоянии устойчивого равновесия, когда всякое изменение в поверхностном слое или уровне действующих нагрузок вызывает к действию процессы,

приводящие систему в равновесное состояние (замена разрушенных вторичных структур новыми, приработка и залечивание образующихся задиров и др.).

Возможны условия нагружения, при которых равновесное состояние динамической системы невозможно, например не обеспечиваются нормальные условия контактного взаимодействия (задирообразование, интенсивное абразивное разрушение и др.). В этих случаях необходимы дополнительные конструкторские или технологические мероприятия.

Отыскание прямых связей этих параметров с эксплуатационными свойствами - трудоемкий процесс. Тем более что эти параметры часто взаимосвязаны и разделить их влияние сложно, а подчас невозможно. Решение подобных задач усложняется многообразием условий нагружения и процессов, протекающих в поверхностном слое при эксплуатации.

Оптимальные параметры состояния поверхностного слоя определяются условиями нагружения.

Величина и характер действующих нагрузок зависят от конструкции узла, условий его сборки и эксплуатации. В случае когда невозможно или нерационально уменьшение уровня действующих нагрузок с помощью конструкторских приемов (изменение габаритов, конструктивных элементов, материалов), равновесное состояние системы поверхностный слой-условия нагружения обеспечивается способами упрочняющей технологии. Упрочнение целесообразно использовать и в тех случаях, когда требуется увеличить ресурс изделия, повысить надежность или получить какие-либо специальные свойства поверхностей деталей.

Необходимость получения эксплуатационных и специальных свойств поверхностного слоя обусловила возникновение целого направления в технологии, которое за рубежом называют «surface engineering». В нашей стране принято использовать термин «поверхностное упрочнение», который обычно трактуется в широком смысле. При этом имеются в виду свойства поверхностного слоя, часто не связанные с механической прочностью.

Например, твердость и прочность не являются критериями, определяющими жаростойкость и сопротивление коррозии поверхностного слоя.

Упрочнение металла в механическом (прочностном) толковании может быть обусловлено разнообразными по физической сущности факторами, причем сами критерии прочности определяются условиями нагружения детали и оцениваются разными характеристиками. В одних случаях это твердость (сопротивление абразивному изнашиванию), в других - предел усталости (динамическое нагружение), в третьих - предел прочности и т.д.

Современное материаловедение выделяет следующие основные направления повышения прочностных свойств материалов:

деформационное упрочнение (наклеп), происходящее за счет увеличения плотности дислокаций;

легирование, обеспечивающее упрочнение путем «связывания» дислокаций атомами легирующих элементов;

фазовые превращения, вызываемые термическим и деформационным воздействиями; фазовый наклеп;

механическое введение в сплав или выделение в нем дисперсных частиц; формирование метастабильных (в том числе аморфных) структур при закалке из жидкой фазы.

Следует отметить, что при поверхностном упрочнении имеют место некоторые дополнительные механизмы увеличения прочности, связанные со строением поверхностного слоя и особенностями технологического воздействия на него. Последние приводят к неравномерности нагрева, деформации, концентрации легирующих элементов по глубине и как следствие к возникновению остаточных напряжений первого рода, градиентов твердости и др. Сюда следует отнести и упрочнение за счет физико-химического модифицирования поверхностного слоя, нанесения покрытий, текстурообразования. На прочность поверхностного слоя оказывает влияние соотношение характеристик подложки и упрочняемого

слоя, в частности твердостей, коэффициентов термического расширения, электрохимических параметров.

Существующие способы поверхностного упрочнения можно отнести к следующим основным группам:

упрочнение без изменения химического состава поверхностного слоя; поверхностное легирование и физико-химическое модифицирование; нанесение покрытий; комбинированные методы упрочнения.

Упрочнение без изменения химического состава выполняется: поверхностным пластическим деформированием (ППД); поверхностным закаливанием; обработкой холодом.

Поверхностное легирование заключается в создании на поверхности легированного слоя, состав которого обеспечивает требуемые эксплуатационные свойства, а физико-химическое модифицирование - в образовании на поверхности слоя химических соединений материала детали за счет протекания химических реакций или образования метастабильных структур, например аморфных.

На практике используют следующие способы поверхностного легирования и физико-химического модифицирования: химико-термическая обработка (ХТО); электроискровое легирование;

лазерное поверхностное легирование и модифицирование; электронно-лучевое поверхностное легирование и модифицирование; ионная имплантация;

обработка в высокотемпературной плазме; анодирование;

термическое, электрохимическое и химическое оксидирование; сульфидирование, фосфатирование и др.

Для защиты деталей авиационной техники от коррозии, износа, эрозии, окисления применяют различные способы нанесения покрытий. Покрытия часто используются также в технологических целях для защиты от насыщения при химико-термической обработке, от брызг металла при сварке, от окисления, для снижения трения при обработке давлением и т.д.

Как было сказано выше, для поверхностного упрочнения применяют отличающиеся по природе упрочняющего воздействия методы: ППД, химико-термическую обработку, высококонцентрированные потоки энергии (лазерные, электронно-лучевые, ионные), нанесение покрытий из материалов с высокими эксплуатационными свойствами и др.

В силу тех или иных причин (увеличение шероховатости, снижение усталостной прочности, высокая пористость, недостаточная прочность сцепления покрытия с подложкой и т.д.) сфера использования многих, несомненно, эффективных процессов упрочнения существенно ограничена. В подобных случаях сочетание с другим способом упрочнения (снижающим шероховатость, повышающим усталостную прочность, уменьшающим пористость, увеличивающим прочность сцепления и др.) дает возможность добиться требуемого состояния поверхностного слоя и тем самым обеспечить высокий уровень эксплуатационных свойств, расширить технологические возможности.

Кроме того, комбинированной обработкой решают задачи увеличения маслоемкости поверхностей трения, упрочнения подложки под наносимое покрытие, повышения точности и т.д.

Методы комбинированного упрочнения целесообразно применять для наиболее ответственных деталей в случаях, когда традиционная технология не обеспечивает требуемый уровень эксплуатационных свойств.

Многообразие упрочняющих эффектов и способов упрочнения представляет широкие возможности по их комбинированию.

7.3 Параметры качества поверхностного слоя

При изготовлении и эксплуатации детали на ее поверхности возникают неровности в слое металла, прилегающей в ней изменяется структура, фазовый и химический состав, возникают внутренние остаточные напряжения. Этот слой и называется поверхностным. Параметры качества классифицируются, и все они могут быть разбиты на 3 группы:

а) Геометрические

- шероховатость
- волнистость
- макроотклонения

б) Физико-механические

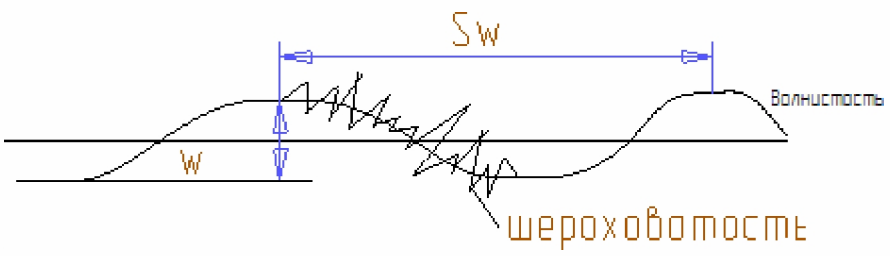
(структура материала, форма фаз, плотность дислокаций раствор блоков и другие) ≈ 9

3.Физико- химические

- фазовый состав (4)
- химический состав
- обобщенные параметры
- деформации
- остаточные напряжения
- экзоэлектронная эмиссия

Геометрические параметры качества.

1. Волнистость.



Rz, Ra, Rmax, Sm, Si, t_p

Рисунок 7.11

Разграничения по геометрическим параметрам на шероховатость, волнистость и макроотклонения осуществляются в зависимости от соотношения шагового параметра к высотному.

$\frac{S}{R} < 50...70$ (шероховатость)

$\frac{S_W}{W} < 70...1000$ (волнистость)

$\frac{S_M}{\Delta} > 1000$ (макроотклонения)

Причина возникновения шероховатости является механизм съема металла при обработке. Волнистость есть результат вибраций ТС, микроотклонения есть не точность позиционирования элементов ТС. Различные микроотклонения формы (выпуклость, вогнутость, отклонения от плоскости, конусообразность) и расположения (отклонение от перпендикулярности, параллельности).

Физико-химические параметры.

Деформационное упрочнение.

Деформационным упрочнением (наклепом) называется повышенная прочность свойств и твердого металла при его пластичной деформации. Природа появления наклепа: в зоне резания наблюдается упруго- пластичная деформация и местный нагрев заготовки от действия сил резания. Под действием силового фактора в атомах кристаллической решетки резко возрастает число дислокации, а это приводит к повышенной прочности свойств, то есть в деформированном слое возрастает предел упругости, текучести и прочности и резко понижаются характеристики пластичности. Однако, в результате нагрева, когда температура достигает или превышает 40 % от температурного плавления, в металле происходит рекристаллизация, которая сопровождается частичным или полным снятием деформационного упрочнения. Таким образом, при обработке металла в поверхностном слое протекают два взаимоисключающих процесса:

1. Деформационное упрочнение
2. Разупрочнение

Поэтому физико-химическое состояние поверхностного слоя при обработке необходимых рассматриваемых как результат взаимодействия этих двух процессов, а получаемые результаты наклепа определяются соотношением интенсивности и скорости протекания этих двух процессов. Наклеп характеризуется двумя основными параметрами: глубиной наклепа

$h_н$ и степенью наклепа 1 $U_н$. Степень наклепа определяется путем измерения микротвёрдости поверхности по глубине и вычисляется по следующей зависимости:

$$U_н = \frac{H_{\mu_{max}} - H_{\mu_{исх}}}{H_{\mu_{исх}}} \cdot 100\%$$

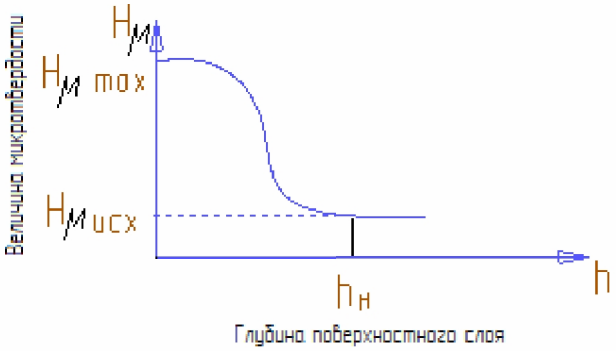


Рисунок 7.12 – Кривая изменения микротвердости материала в поверхностном слое

Интенсивный наклеп отрицательно сказывается на работоспособности детали, особенно если они эксплуатируются при повышенных температурах или работы в агрессивных средах, поэтому при расчете и установлении решения резко стремится определить такие условия обработки, которые бы обеспечили минимальные и равномерный наклеп поверхности.

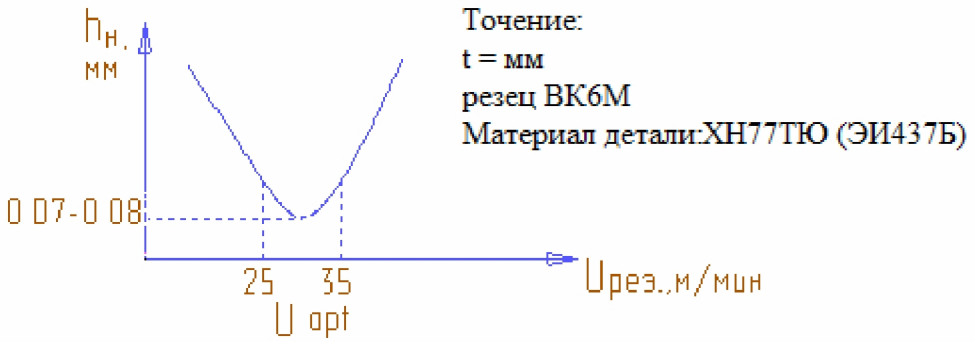


Рисунок 7.13 – Влияние скорости резания при точении на глубину наклепа

7.4 Остаточные напряжения

Остаточным напряжением называется внутреннее напряжение, которое сохраняется в детали после снятия с нее внешней нагрузки. По протяженности силового поля внутреннее напряжение разделяется на:

1. напряжение первого рода (макронапряжения). Охватываемые области, соизмерения с объемом детали и возникновение, как результат неоднородных силовых и температурных полей внутри детали.

2. напряжение второго рода (микронапряжения). Распространение на объем зерна металла или на группу зерен

3. напряжение третьего рода (субмикронапряжения). Относится к искажению кристаллической решетки.

Следует отметить, что напряжение второго и третьего рода дезориентируются и они не вызывают коробления детали при ее разрухе.

7.4.1 Механизм образования внутреннего напряжения

Вследствие трения между задней поверхностью инструмента и вновь образующей поверхностью детали, верхние слои подвергаются пластичной деформации растяжения, а ниже лежащие растягиваются упруго. После прохождения резца верхние слои будут препятствовать возвращению в исходное состояние нижних слоев. В результате в верхних слоях возникает сжимающее напряжение, а нижние слои имеют растягивающее напряжение. Интенсивно нагреваясь в процессе резания верхние слои, стремясь удлиниться, будут подвергаться сжатию со стороны более холодных внутренних слоев. Если при этом возникает напряжение, превысят предел текучести металла, то возникает дополнительная пластичная деформация сжатия верхних слоев и перераспределение внутренних напряжений. Во время последующего охлаждения нижележащие слои будут препятствовать укорачиванию верхних слоев до их первоначальной длины. В результате в верхнем слое возникает растягивающее напряжение, а в нижележащих – сжимающие.

Таким образом, появление напряжения сжатия или растягивания в поверхностном слое будет обуславливаться тем, какой из факторов – силовой или тепловой будет доминироваться при обработке.

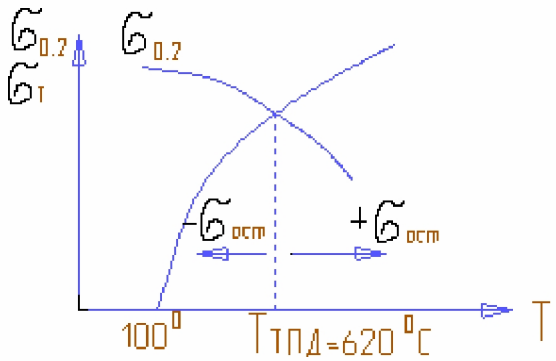


Рисунок 7.14 – Характер изменения температурных напряжений (σ_T) и предела текучести материала ХН77ТЮР (σ) в зависимости от температуры

ТПД - термопластичная деформация в материале ХН77ТЮР

Если по условию в зоне резания температура больше, то в поверхностном слое возникать напряжение растяжения ($+\sigma_{ост}$). Если температура меньше, то возникновение сжимающего напряжения ($-\sigma_{ост}$).

Остаточное напряжение имеет свойство релаксации, т. е. уменьшения или исчезновения и чем выше температура эксплуатации, тем быстрее идет процесс релаксации.

7.5 Влияние параметров качества поверхностного слоя на эксплуатационные свойства детали

- **Износостойкость** – это способность детали машин сопротивляться разрушению при трении. Примерно к трению качения имеется понятие контактные усталости, т. е. процесс усталости поверхности при их качении.

- шероховатость: Исследованиями установят, что износостояние повышается с увеличением относительной опорной длины профиля и с понижением шагового параметра профиля.

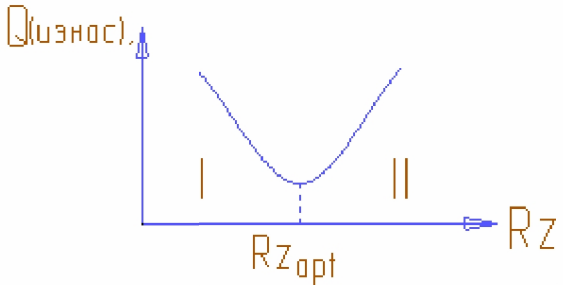


Рисунок 7.15 – Влияние шероховатости трущихся поверхностей на их износ

В зоне I понижение Rz приводит к повышению износа (рис. 7.15). Это объясняется тем, что на чистых поверхностях происходит молекулярное схватывание плотносоприкасающихся участков поверхности (адгезия) с последующим вырывом металла.

На II участке повышение износа объясняется механическим зацеплением и разрушением неровностей.

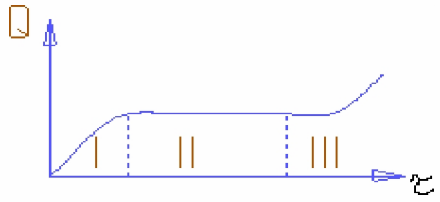


Рисунок 7.16 – Закономерность протекания износа трущихся поверхностей во времени

I-участок приработки: происходит переход шероховатости от исходных значений некоторым устанавившимся.

II-Участок нормального износа, на котором имеет место относительная постоянная условия трения.

III-Участок аварийного износа, когда в трущих парах происходит изменение геометрических параметров и ухудшаются условия трения.

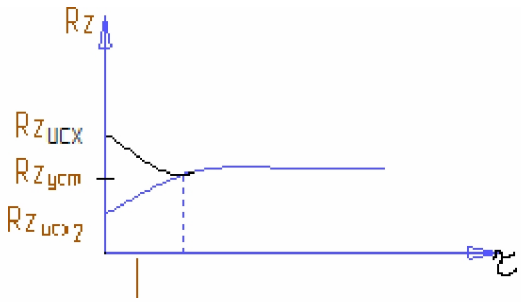


Рисунок 7.17 – Изменение шероховатости трущихся поверхностей, имеющих различную исходную шероховатость $R_{z\,исх}$.

В процессе приработки у двух различных деталей с исходной Rz происходит стабилизация этого параметра около некоторого установленного параметра (рис. 7.17). Назначение оптимальной шероховатости позволяет понизить износ в 2-5 раз, а сам период приработки сократить.

- Наклеп. Он благоприятно влияет, так как при деформированном упрочнении возрастает поверхностная твердость и снижается взаимное внедрение и деформирование микровыступов трущихся поверхностей.

- Остаточное напряжение. Они не оказывают влияния на износ.

Усталостная прочность - это способность детали сопротивляться разрушению в течение определенного времени при действии на них знакопеременных нагрузок (σ_{-1})

- шероховатость: снижение шероховатости приводит к повышению усталостной прочности. Главным концентратором напряжения на профиле шероховатости является впадина, с увеличением глубины которой и понижением радиуса впадины концентрация напряжения повышается. Пример влияния различных технологий отделочной обработки лопаток К и полученной шероховатости профиля на усталостную прочность:

1. Дробеструйное упрочнение + полировка

Ra=0.8мкм $\rightarrow \sigma_{-1} = 250$ МПа

2. Дробеструйное упрочнение + виброгалтовка

$Ra=0.2мкм \rightarrow \sigma_{-1} = 370МПа$

- Наклеп: при работе детали в условиях нормальной температуры наклеп оказывает благоприятное влияние на усталостную прочность. Объясняется это тем, что упрочненный поверхностный слой металла затруднят возникновение и развитие первоначальной усталости трещин, которая является причиной разрушения. Для детали работающих в условиях повышенных температур, оптимальным из условия усталостности и длительности прочности будет являться поверхностный слой с незначительным деформационным упрочнением (остаточная деформация $\varepsilon <$ 1…4%).

Однако технологические методы обработки дают большую величину и это приводит к снижению усталостной прочности.

Для повышения усталостной прочности таких деталей необходимо удалить поверхностные наиболее деформированные слои. Это можно сделать методом ЭХО, методом электрополировки или виброконтактного полирования (абразивной бумагой). Также используется соответствующие операции ТО: отпуск, нормализация, при которой металл переводиться в равновесное термодинамическое устойчивому состоянию.

- Остаточные напряжения: влияние остаточного напряжения необходимо рассматривать с учетом явления их релаксации. Если температура эксплуатации больше температуры рекристаллизации (40%Тпл), тогда остаточное напряжение быстро релаксируется и их влияние на усталостную прочность можно не учитывать. Для детали, работающей при нормальной температуре, когда процесс релаксации протекает медленно, остаточное напряжение сжатия благоприятно влияют на усталостную прочность и наоборот напряжение растяжения сжимают ее.

Пример: Лопатка компрессора упрочнена обдувной дробью или никрошарик; диски и волн - алмазного выглаживания обкатывающим шариком и роликом.

Контактная жесткость - это способность поверхностных слоев детали находиться в контакте, сопротивления действующих сил, которые стремятся их деформировать. Различная контактная жесткость плоских стыков и цилиндрических соединений. Она характеризуется величиной сближения сопрягаемых поверхностей, которые происходят как за счет деформации шероховатости, так и за счет деформации нижележащих слоев.

- Шероховатость. Шероховатость и волнистость поверхностей, которая находиться в сопряжении уменьшает фактическую площадь контакта, а, следовательно, уменьшает контактную жесткость, поэтому повышения контактной жесткости необходимо Ra, Rz и площадь уменьшать, а t_p увеличивать. Примеры увеличения контактной жесткости:

1. При сборке фланцевого соединения осуществляется в начале, предварительную затяжку крепежа для снятия соприкасающихся поверхностей и увеличение контактной жесткости.

2. Повышают твердость поверхностей (ТО)

3. Для цилиндрического соединения при сборке их предпочтение отдается тепловой посадке по сравнению с силовой.

- Наклеп. Он оказывает положительное влияние на увеличение контактной жесткости. Это объясняется тем, что при наклепе снижается контактная деформация поверхности стыка за счет увеличения ее пластичной составляющей.

- Остаточные напряжения. Они не влияют на контактную жесткость.

Коррозионная стойкость. Природа коррозии металла объясняет их термодинамическую неустойчивость. Вследствие этого происходит процесс коррозионного разрушения поверхности, которая протекает самопроизвольно при воздействии окружающей среды. Различают два вида коррозии:

1. Электрохимическая. Она происходит при действии на металл атомной среды, а так же растворов электролитов (кислот, солей, щелочей).

- Шероховатость. Установлено, что повышенная шероховатость способствует усилению процесса коррозии. Это объясняется тем, что при

большой шероховатости во впадине профиля собираются коррозирующие вещества, которые ускоряют процесс коррозии. Кроме того, на гребешках при высокой шероховатости защитно-окисные пленки (пассивирующие) менее устойчивы, чем на кислых поверхностях, таким образом, для повышенной коррозионной стойкости необходимо понизить высотные параметры профиля шероховатости.

- Наклеп. Он снижает коррозионную стойкость. Это объясняется тем, что защитно-окисные пленки на деформируемом металле менее прочные и они, легче разрушаются, а это способствует ускоренному процессу коррозии.

- Остаточные напряжения. Они не влияют на коррозионную стойкость.

Повышение коррозионной стойкости осуществляется путем нанесения защитных покрытий.

2. Химическая коррозия. Она возникает при действии на металл сухих газов (сернистый газ, сероводород, углекислый газ) при повышенных температурах. При этом поверхностные слои покрываются окалиной, т. е. имеет место повышение веса.

Жаростойкость - способность сопротивления окислению различных металлов в условиях высокотемпературной газовой коррозии. Разрушение начинается с 200 ^{0}C . Жаростойкость характеризуется скоростью окисления поверхности, и измеряется привесом единицы поверхности за определенный промежуток времени.

- Химический состав. Жаростойкость определяется химическим составом материала.

Таблица 7.1 – Жаростойкость материалов при различных температурах эксплуатации

материал	температура, °С			
	900	1000	1100	1200
ХН77ТЮР	0,07	0,2	0,4	0,8
ХН78Т	0,03	0,09	0,25	0,5

Жаропрочность - свойство металлов и сплавов сопротивляться разрушению при работе в условиях высокой температуры.

$\sigma^{t}_{в/\tau}$ – длительная прочность. Постоянное напряжение, приложенное к детали при температуре t и приводящей к ее разрушению в течение заданного промежутка времени τ.

$\sigma^{900(^0C)}_{в/1000}$ (ч).

ХТ77ТЮР: $\sigma^{500}_{в/100} = 830МПа$; $\sigma^{800}_{в/100} = 196МПа$

$\sigma^{1000}_{в/100} = 0$; $\sigma^{800}_{в/1000} = 98МПа$;

ЖС6К (литой): $\sigma^{800}_{в/100} = 500МПа$; $\sigma^{800}_{в/100} = 372МПа$.

Для повышения $\sigma^{t}_{в/\tau}$ – применяют термобарьерные защитные покрытия. На жаропрочность основное влияние оказывает химический материал состава и технология изготовления.

- Химический состав материала. Имеются определенные группы материалов, область применения, которого ограничена t эксплуатации.

1. Полимерные композиционные материалы: 230-280 ^0C
2. Алюминиевые сплавы: 250 ^0C
3. Титановые сплавы: 650 ^0C
4. Никелевые сплавы: 1100 ^0C
5. Керамика: 1500 ^0C

- Технология изготовления.

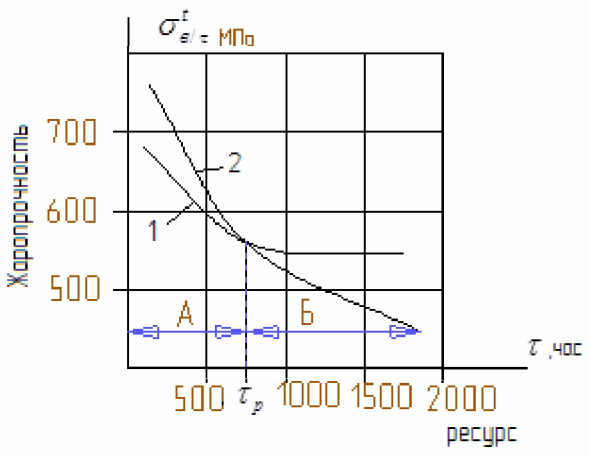


Рисунок 7.18 – Типичный характер жаропрочности для сплава ХН77ТЮР

1- электрополированные образцы

2- образцы, упрочнение обкатыванием

Из графика видно, что при некотором значении времени τ_p. Имеет место равнопрочность технологии вариантов обработки. В зоне А с точки зрения увеличения жаропрочности и длительности прочности эффективно применение метода упрочнения. В зоне Б технология обработки дополнительно исключает пластичную деформацию поверхности. Таким образом, при изготовлении детали в сложной зависимости находящихся три важнейших обстоятельства; Технология изготовления, температура эксплуатации и ресурсы. Даже для малых ресурсов имеет место своя степень деформации металла и своя температура эксплуатации, при которой можно получить положительный эффект от упрочнения. Выбрать оптимальную технологию изготовления детали в зависимости от условия ее эксплуатации (температура и ресурс) позволяют зависимости, которые называются температурно-ресурсные зоны (блокирующие контуры) работоспособности материала.

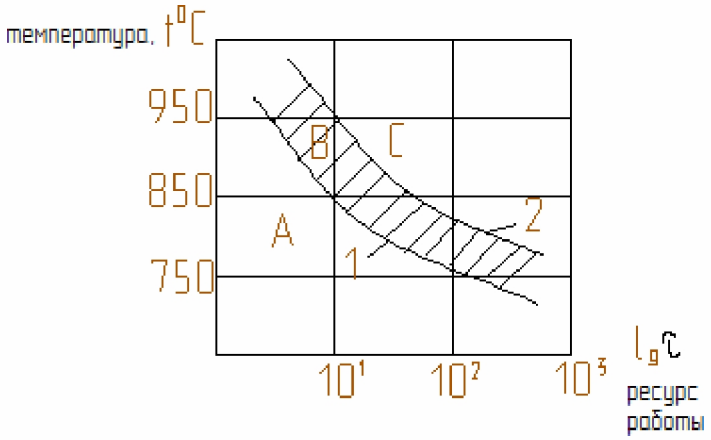


Рисунок 7.19 – Температурно-ресурсные зоны (блокирующие контуры) работоспособности сплава ХН77ТЮР в зависимости от технологии обработки поверхности

1 - верхняя грань по температуре и ресурсу применимости упрочнения методов (ППД).

2 - нижняя грань применимости технологии, в которой участвует деформационное упрочнение.

Если по условию работы деталь оказывается в зоне А, то здесь эффективно применять метод упрочнения. В зоне С условия эксплуатации таковы, что пластичная деформация, приводящая к ТД неустойчивому состоянию металла, снижает эксплуатационные свойства детали, поэтому для этой зоны ППД, т. е. любой наклеп, недопустимы. Для этой зоны применяют электрополировку вакуумный отжиг или отпуск в среде защищенных газов с целью удаления наклепанного слоя. В зоне Б целесообразно применять комбинированные технологии сочетающие деформационное упрочнение и ТО, причем величина остаточной деформации в этой зоне не для превышения 3-6%.

7.6 Влияние режимов и условий обработки на параметры качества поверхности

Регулирование шероховатости поверхности.

На шероховатость поверхности оказывают влияние следующие факторы:

1. Способ механической обработки.
2. Состав и структура обработки материала.
3. Режимы резания.
4. Состав СОЖ.
5. Геометрические параметры режущего инструмента.
6. Состояние оборудования и жесткость ТС.

1. Каждый способ обработки обеспечивает определенную высоту микронеровностей. Например, черновое точение – Ra = 12,5 мкм, чистое точение - Ra = 2,5…1,25 мкм, тонкое - Ra =0,63 мкм.

2. Повышенное содержание углерода в стали способствует увеличению ее твердости, а это определенно уменьшает шероховатость при обработки. При обработке цветных сплавов получает меньшая шероховатость, чем при обработке сталей.

3. Говоря о режиме обработки, будем выделять: скорость резания, подача, глубина резания.

3.1Влияние скорости резания.

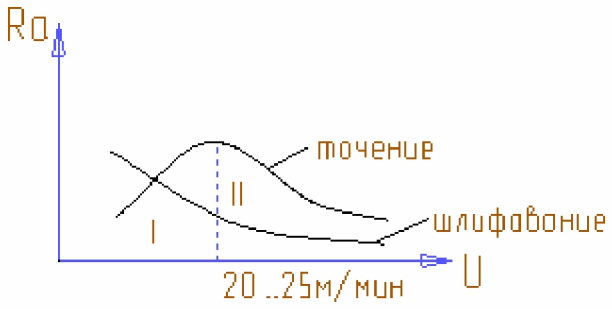


Рисунок 7.20 – Влияние скорости резания на шероховатость поверхности при лезвийной абразивной обработке

При скорости до 20…25 м/мин увеличение скорости точения приводит к увеличению Ra. Это объясняется образованием нароста на режущей кромке инструмента при малых скоростях резания. При дальнейшем увеличении скорости Ra уменьшается, так как прекращается процесс нароста-образования. При шлифовании увеличение скорости всегда приводит к уменьшению Ra. Это объясняется тем, что уменьшенная величина срезаемого слоя уменьшает усилия, приводящих на режимах зерно и понижает коэффициент трения.

3.2 Влияние подачи.

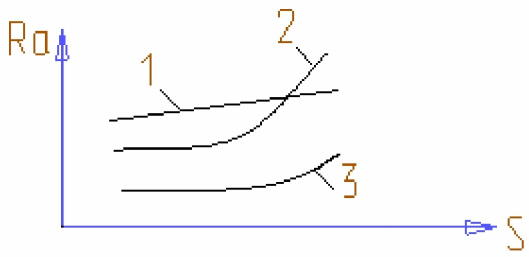


Рисунок 7.21 – Влияние подачи на шероховатость поверхности при различных методах обработки

1- Сверление, зенкерование, фрезерование

2- Точение

3- Шлифование

3.3 Влияние глубины резания.

Глубина незначительно изменяет Ra при обработке лезвийными инструментами при условии достаточной жесткости ТС. При обработке абразивный инструмент увеличивает температуру, следовательно, увеличивает Ra.

4. СОЖ оказывает непосредственное влияние на качество поверхности. Установлено, что применение СОЖ позволяет уменьшить Ra на 25-40% по сравнению с сухой обработкой. Это объясняется тем, что СОЖ обладает смазочным, охлаждающим и моющим эффектом, который позволяет понизить коэффициент трения, силы резания, температуру в зоне резания,

кроме того, СОЖ способствует поддержанию высоких режимов свойств инструмента. На Ra влияет также и способ подачи СОЖ (напорная струя, через поры круга). В качестве СОЖ используются: эмульсия (мыльная), минеральные масла, керосин.

5. Основное влияние вносит износ инструмента, который увеличивает трение на заданной поверхности, что приводит к увеличению Ra. Для обеспечения высокой частоты поверхности рекомендуется использовать остро заточенные инструменты, доведенные на алюминиевом круге. При образовании обработки основное влияние оказывает раствор, образующих зерен и тип связки. При увеличении зернистости наблюдается увеличение Ra. Установлено, что после правки круга шероховатость увеличивается по сравнению с засаленным кругом.

6. Жесткость ТС оказывает специфическое влияние на шероховатость Уст, что Ra по образованию поверхности увеличивается в местах наибольшего прогиба. Колебания Ra от максимального до минимального может достигать 2-3. В случае появления автоколебания по причине недостаточной жесткости имеет место увеличение Ra.

7.7 Деформационное упрочнение (наклеп и остаточные напряжения) при резании

Наклеп поверхностного слоя зависит от многих технологических факторов: метода обработки, элементов режима резания, состояния и геометрических параметров режущего инструмента, свойств смазывающе-охлаждающих жидкостей и схемы охлаждения, вибраций системы станок-приспособление - инструмент - заготовка.

В качестве примера в табл.7.2 и 7.3 приведены значения глубины h_c и степени N наклепа поверхностного слоя при обработке сталей и сплавов на основе железа, никеля и титана. Эти данные, в частности, показывают, что при примерно одинаковых условиях резания поверхностный слой у титановых сплавов в значительно меньшей степени упрочняется по сравнению со сталью. Данные табл.7.2 и 7.3 показывают также, что одним и

тем же методом деформационное упрочнение может быть сформировано в очень широких пределах. Вызвано это целым рядом физических причин и технологических факторов.

Таблица 7.2 – Значение глубины и степени наклепа в зависимости от методов обработки

Метод обработки	Условия обработки	Глубина наклепа h_c, *мкм*	Степень наклепа N, %	$\sigma_{\tau\,max}$, *МПа*
1	2	3	4	5
Черновое точение сталей и сплавов	-	400 ÷ 1000	30 ÷ 50	+(200 ÷ 600)
Черновое точение сталей и сплавов	$t = 0{,}5 \div 1{,}0$ *мм* $s = 0{,}07 \div 0{,}2$ *мм / об*	50 ÷ 160	15 ÷ 30	+(200 ÷ 700)
Черновое точение титановых сплавов	$t = 0{,}25 \div 1{,}0$ *мм* $s = 0{,}08 \div 0{,}2$ *мм / об*	20 ÷ 100	10 ÷ 20	+(300 ÷ 600)
Чистовое торцовое фрезерование сталей и сплавов	$t = 0{,}5 \div 1{,}0$ *мм* $s = 0{,}05 \div 0{,}25$ *мм / об*	60 ÷ 200	15 ÷ 40	+(250 ÷ 650)
Чистовое шлифование абразивным кругом сталей и сплавов	-	40 ÷ 150	10 ÷ 25	+(100 ÷ 800)
Чистовое шлифование лентой	-	30 ÷ 80	5 ÷ 20	-(100 ÷ 800)
Полирование	-	20 ÷ 60	5 ÷ 15	-(50 ÷ 500)
Электрополирование	-	0	0	0
Обкатывание роликом (шариком)	-	60 ÷ 800	15 ÷ 50	-800 ÷ +200
Алмазное выглаживание	-	50 ÷ 400	10 ÷ 40	-(150 ÷ 550)

Таблица 7.3 – Глубина и степень наклепа поверхностного слоя в зависимотси от марки стали

Марка стали	Содержание углерода, %	Предел прочности $\sigma_в$, *МПа*	Оптимальная скорость резания v_0, *м/мин*	Глубина наклепа h_c, *мкм*	Степень наклепа *N*, %
Э	0,06	363,0	490	75	55
10	0,14	402,2	390	55	40
20	0,22	461,1	380	-	-
45	0,49	618,0	240	47	26
У8А	0,80	696,5	185	-	-
У12А	1,19	902,5	127	32	15

Влияние технологических факторов на наклеп поверхностного слоя в виде наиболее стройных закономерностей получено применительно к лезвийной обработке - точению и фрезерованию - как к наиболее простым методам обработки. Рассмотрим некоторые закономерности влияния элементов режима резания на деформационное упрочнение.

Скорость резания как температурно-скоростной параметр может выступать в качестве того или иного фактора.

1. Скорость резания как фактор, определяющий скорость протекания пластической деформации металла поверхностного слоя. С повышением скорости деформации, как известно, происходит рост прочностных свойств при одновременном снижении пластических. Все это должно действовать в сторону уменьшения наклепа.

2. Скорость резания как фактор, изменяющий ширину зоны стружкообразования. При повышении скорости резания до некоторой величины происходит сужение пластической зоны и уменьшение глубины ее распространения ниже линии среза. То и другое действует в сторону уменьшения наклепа.

3. Скорость резания как температурный фактор, изменяющий степень развития нароста и характер обтекания и подмятая металла из зоны стружкообразования в сторону задней грани. Нарост увеличивает действительный радиус округления режущей кромки и тем самым способствует увеличению глубины и степени наклепа.

4. Скорость резания как температурный фактор влияет на изменение интенсивности процесса разупрочнения. С повышением температуры скорость протекания процесса разупрочнения возрастает, что неизбежно должно приводить к уменьшению наклепа.

5.Скорость резания как фактор, изменяющий величину коэффициента трения на задней поверхности инструмента. Исследования показывают, что зависимость коэффициента трения от скорости резания носит экстремальный характер с минимумом на некоторой оптимальной по интенсивности износа скорости резания. Очевидно, что снижение коэффициента трения будет способствовать снижению наклепа, а его повышение - более интенсивному деформационному упрочнению металла поверхностного слоя.

6. Скорость резания как температурный фактор, способствующий самозакаливанию поверхностного слоя и наклепу при фазовых превращениях.

7. Скорость резания как фактор, изменяющий температуру металла поверхностного слоя и характеристики его пластичности. Для многих конструкционных материалов в некотором диапазоне температур наблюдается охрупчивание (провал пластичности), выражающееся в снижении относительного удлинения и поперечного сужения (стандартных характеристик пластичности).

При обработке материалов резанием повышение температуры до значений, соответствующих температурному диапазону провала пластичности, будет способствовать снижению наклепа, а дальнейшее повышение температуры (скорости) должно действовать в сторону повышения наклепа, т.к. пластичность в этом случае повышается.

Таким образом, наклеп, наблюдаемый на обработанной поверхности детали, определяется совокупным действием рассмотренных факторов. Анализ физических причин, приводящих к изменению наклепа при изменении скорости в широких пределах, позволяет заключить, что зависимости $h_c = f(v)$ и $N = f(v)$ должно носить экстремальный характер с

точкой минимума в области оптимальных скоростей резания. На самом деле, при повышении скорости резания в некотором диапазоне факторы 1, 2, 3, 4, 5, 7 будут способствовать снижению наклепа; при дальнейшем же повышении скорости резания факторы 5,6,7 будут приводить к возрастанию глубины и степени деформационного упрочнения поверхностного слоя. Приведенные на рис. 4.1 экспериментальные зависимости параметров наклепа от скорости резания, действительно, показывают, что функции $h_c=f(v)$ $uN=f(v)$ экстремальны. С повышением скорости резания на всех подачах глубина и степень наклепа первоначально снижаются, достигают минимума при некотором значении скорости резания, а затем повышаются. Наличие минимума наклепа обработанной поверхности является весьма важным свойством найденных оптимальных скоростей резания, т.к. для повышения эксплуатационных свойств деталей из конструкционных материалов весьма важно избегать образования наклепа при механической обработке.

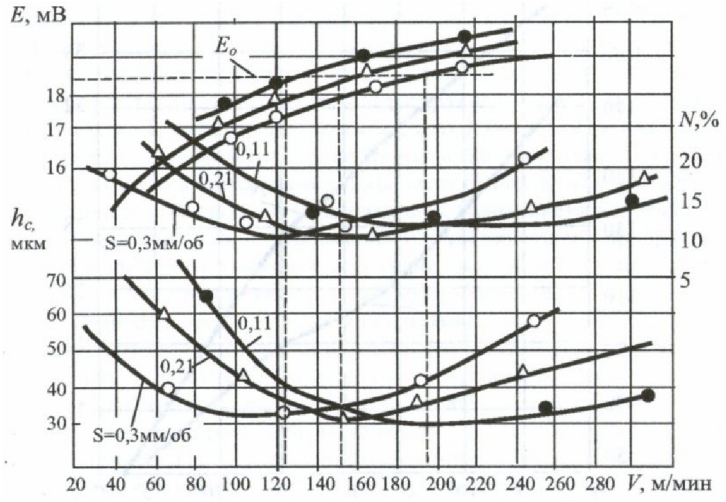


Рисунок 7.22 - Влияние скорости резания на глубину и степень наклепа и термо-ЭДС при точении стали 13Х12Н2МФ резцом Т15К6: t = 1,0 мм; h_2 < 0,1 мм; γ = +5°; $\alpha = \alpha_1 = 10°$; $\varphi = \varphi_1 = 45°$; □ = 0°

Геометрическим параметром режущего инструмента, наиболее резко изменяющим условия стружкообразования, является передний угол.

Соответственно данный геометрический параметр и наиболее существенно влияет на наклеп образующейся при резании поверхности. Наиболее интересные в этом отношении данные получены применительно к точению никелевого сплава ХН70ТЮР (рис.7.23). Из приведенных данных видно, что передний угол резца существенно влияет на глубину и степень наклепа. Так, например, при изменении γ от +15° до - 15° глубина наклепа увеличивается почти в три раза,

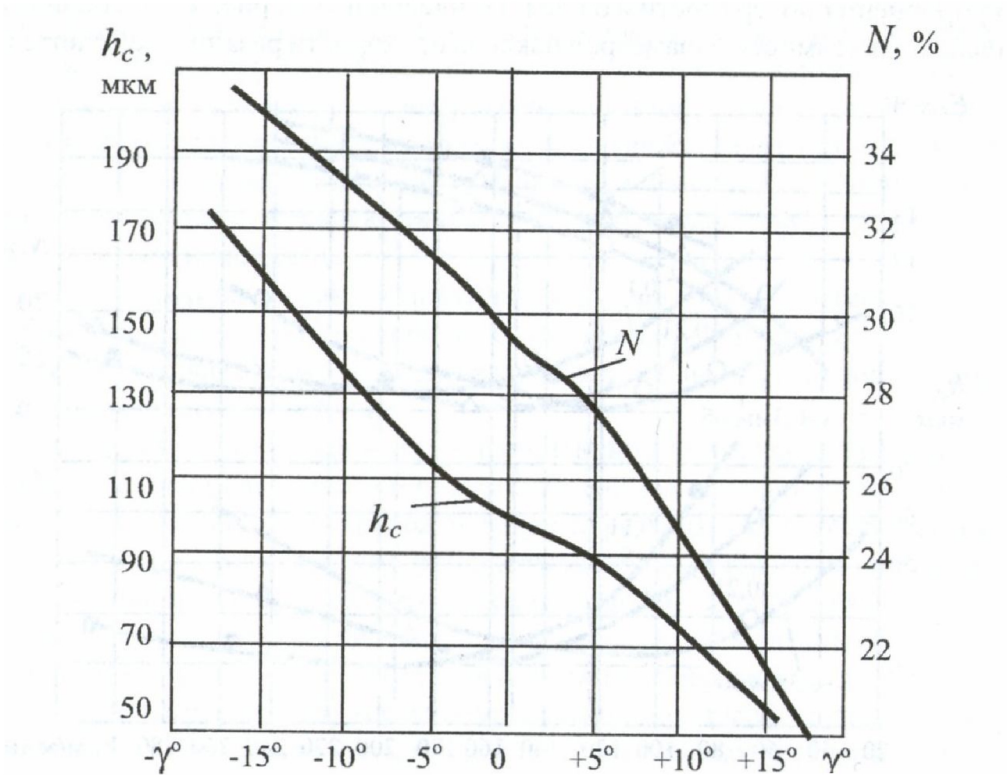


Рисунок 7.23 – Влияние переднего угла на глубину и степень наклепа при точении сплава ХН70ТЮР резцом ВК6М: $\upsilon = 23 м/мин?; S = 0{,}2 мм/об,$

$$t = 1{,}0 мм; \varphi = \varphi_1 = 45^0; \alpha = \alpha_1; r = 1{,}0;$$

степень наклепа возрастает с 22% до 35%. Приведенная закономерность может быть объяснена ростом величины относительного сдвига в отдельных объемах металла и сопротивлением движению стружки по передней поверхности.

Различные по свойствам и структуре стали и сплавы по-разному упрочняются (наклёпываются) при механической обработке. Более пластичные и вязкие материалы, как правило, при механической обработке

имеют и больший наклеп. При многофазной структуре больший наклеп получают те структурные составляющие, которые более склоны к деформации и упрочнению. Эти выводы подтверждаются экспериментальными данными табл. 7.3 применительно к сталям и табл. 7.4 - применительно к никелевым сплавам. Как следует из приведенных данных (табл. 7.3), изменение содержания углерода от 0,06% в электротехнической стали Э до 1,19% в стали У12А приводит к повышению твердости и прочности углеродистых сталей (например, предел прочности повышается соответственно от 363 МПа до 902,5 МПа). Эти изменения в прочности и пластичности приводят к изменениям и в величине деформации поверхностного слоя: с повышением у стали сопротивления пластическому деформированию и разрушению наблюдается закономерное снижение глубины и степени наклепа обработанной поверхности.

Применительно к группе жаропрочных сплавов установлено, что влияние физико-механических свойств на наклеп поверхностного слоя зависит от уровня скоростей (температур) резания. При работе на сравнительно низкой скорости резания (табл. 7.4) средняя температура контакта при точении жаропрочных никелевых сплавов находится в пределах 450÷550°С. При этих температурах прочностные свойства сплавов практически одинаковые. В незначительных пределах колеблется также коэффициент трения по задней поверхности. Пластические же свойства (относительное удлинение) и коэффициент упрочнения материала при деформации κ с увеличением жаропрочных свойств сплавов значительно снижаются (табл. 7.4). В соответствии с этим снижением закономерно снижаются и параметры наклепа.

Особый интерес представляют данные по наклепу при точении рассматриваемых сплавов на оптимальных по интенсивности износа скоростях резания (табл. 7.5). В этом случае средняя температура контакта повышается от 710°С до 850°С (от менее жаропрочного сплава № 1 до самого жаропрочного № 6, причем чем жаропрочнее сплав, тем выше для него и

оптимальная температура контакта). В указанном диапазоне температур пластические свойства и коэффициент упрочнения для различных сплавов находятся примерно на одинаковом уровне. Вместе с тем эксперименты показывают, что с увеличением степени легирования сплавов глубина и степень наклепа (при скоростях, равных оптимальным) снижаются. Так, дня сплава № 1 при оптимальной

скорости резания 35 м/мин h_c и N соответственно составляют 80 мкм и 26%, для сплава №4 при h_c = 25 м/мин - 65 мкм и 20,5%, а для сплава №6 при v = 35 м/мин - 35 мкм и 18%. Анализ данных по микротвердости поверхностного слоя и характеристик механики процесса резания показал, что глубина и степень наклепа находятся в тесной связи с коэффициентом трения по задней поверхности снижение h_c и N для более жаропрочных сплавов может быть объяснено снижением коэффициента трения (табл.7.5).

Таблица 7.4 - Прочностные и пластические свойства никелевых сплавов и параметры наклепа при точении

Условный номер сплава	Температура резания θ, °С	Предел прочности σпч, Н/мм²	Относительное удлинение δ, % при θ, °С	Коэффициент упрочнения K при θ, °С	Наклеп h_c, мкм	Наклеп N, %
1	450	95	32	1,57	150	29
2	450	100	24	1,3	130	25
3	500	100	22	1,29	120	31
4	510	100	22	1,36	100	30
5	520	100	17	1,22	90	27,5
6	550	101	14	1,2	70	24

Рассматривая влияние инструментального материала на наклеп поверхностного слоя, можно отметить, что наиболее общая закономерность заключается в следующем: инструментальный материал, обеспечивающий меньшее значение коэффициента трения между рабочими поверхностями режущего клина и обрабатываемым металлом, формирует обработанную поверхность более высокого качества. Так, например, поверхность стали

1Х18НЮТ, обработанная резцом Т14К8, имеет меньшую микротвердость, глубину и степень наклепа по сравнению с поверхностью, обработанной резцом ВК8. С увеличением содержания карбидов вольфрама в инструментальном материале повышается слипаемость материалов инструмента с обрабатываемой сталью, т.е. усиливаются процессы адгезии, усложняется обтекание обрабатываемого металла режущего инструмента, что вызывает увеличение характеристик наклепа обработанной поверхности.

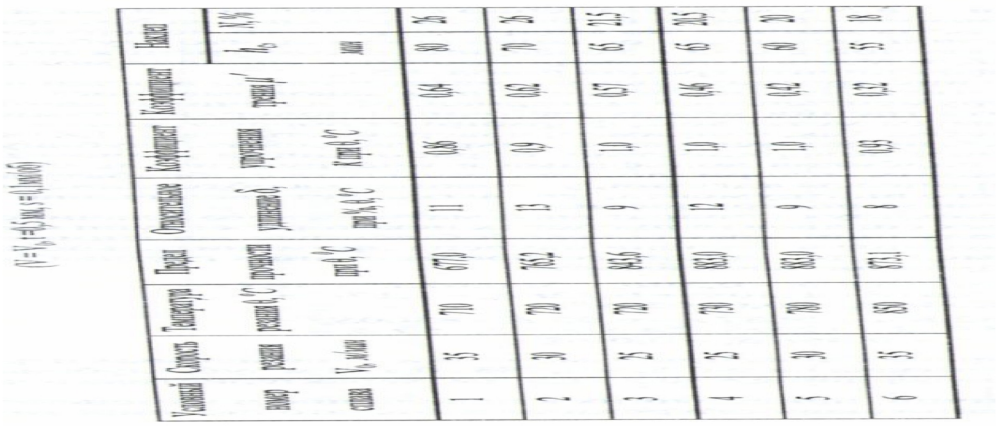
В настоящее время, используя аппарат математического планирования эксперимента для различных сплавов (в пределах некоторых групп материалов), ряд исследователей получили некоторые обобщенные зависимости для расчетного определения глубины и степени наклепа применительно к оптимальному резанию. Например, для торцового фрезерования группы титановых сплавов получены следующие зависимости:

$$N= 13,71 +74,02\ S_2+ 3,33t + 6,83r- 0,30\delta_n - 306,67S_z^2 - 38S_zt - -70S_zr- + 2,57S_z\delta_n-4,67t^2+ 1,30tr + 0,22t\delta_n-1,17r^2 + 0,04r\delta_n+ 0,0005\ \delta_n^2, \quad (4.1)$$

$$h_c = 165,48 + 728,91S_z + 52,83t +79,37r - 6,92\delta_n - 8300S^2_z +650S_zt - 275\ S_zr+ +21,5S_z\delta_n -123\ t^2- 24,5tr + 2,25t\delta_n- 20,75\ r^2 + 0,46r\delta_n - 0,09\ \delta_n^2.$$

Данные зависимости справедливы при изменении независимых переменных в следующих пределах: подача на зуб S_z = 0,083÷0,133 м/зуб, глубина резания t=0,5÷1,0 мм; радиус при вершине r =0,5÷1,5 мм; характеристика пластичности δ_n = 40÷70%.

Таблица 7.5 – Прочностные и пластические свойства сплавов и параметры наклепа



Анализ физических причин, приводящих к наведению и изменению напряжений 1 рода при изменении скорости резания в достаточно широких пределах, позволяет заключить, что в слое, прилегающем к поверхности, в зависимости от температурных условий могут формироваться как растягивающие, так и сжимающие напряжения и зависимость $\sigma_{max} = f(v)$ должна иметь характерную точку перегиба или носить экстремальный характер.

Экспериментальные исследования подтвердили сложный характер изменения остаточных напряжений в зависимости от скорости резания (рис. 7.24). Видно, что при некоторой скорости напряжения резко возрастают (в 1 горизонте), далее стабилизируются. Значительное влияние на остаточные напряжения оказывают свойства обрабатываемого материала. Установлено, что при резании жаропрочных никелевых сплавов на низких скоростях (когда не протекают термопластические деформации) основным фактором, определяющим интенсивность деформации и возникновение напряжений, являются пластические свойства.

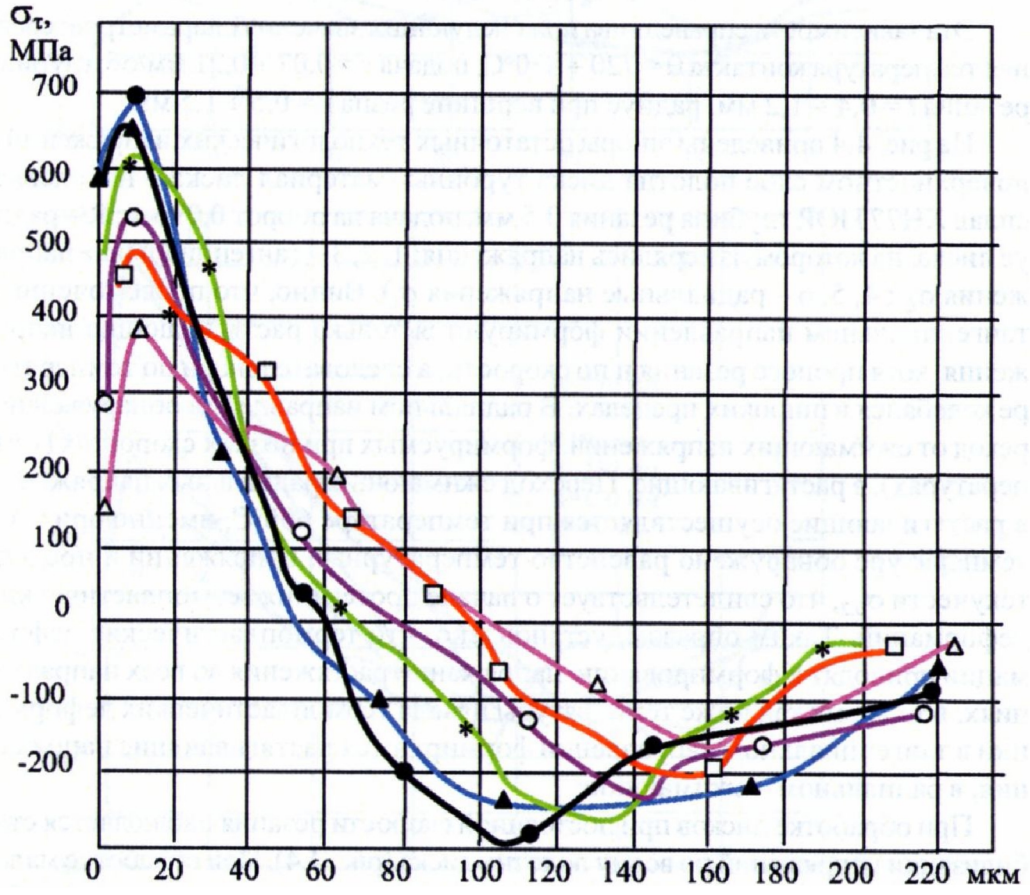


Рисунок 7.24 – Влияние скорости резания на величину и характер эпюры тангенсальных остаточных напряжений при точении сплава ХТ70ТЮР резцом ВК6М:

$t = 0{,}5мм; s = 0{,}09мм/об; \Delta - V = 10м/мин; * - V = 30м/мин; \square - V = 15м/мин;$

$\blacktriangle - V = 35мм/мин;\ O - V = 20мм/мин;\ \bullet - V = 50мм/мин$

В частности, применительно к указанным сплавам максимальное значение тангенциальных напряжений может быть определено по величине относительного удлинения 8 (характеристика пластичности):

$\square_{\tau max} = 22.5 + 0{,}59\delta$

Когда же протекают термопластические деформации, напряжения в поверхностном слое сплавов зависят от средней температуры резания □:

$\square_{\tau max} = 34 + 0{,}044\square$.

При обработке никелевых деформируемых жаропрочных сплавов на оптимальных по интенсивности износа скоростях резания максимальная величина остаточных тангенциальных напряжений может быть определена из зависимости

$\sigma_{\phi max}$ = 77 -0,09□ -142S-3,1t+ l,4r+O,O960j +24,9st- I6,1sr-2,2tr.

Эта зависимость справедлива при следующих значениях параметров: средняя температура контакта □= 720÷850°С, подача *s* = 0,07÷0,21 мм/об; глубина резания t= 0,4÷1,2 мм, радиус при вершине резца r = 0,5÷1,5 мм.

На рис. 4.4 приведены эпюры остаточных технологических напряжений в поверхностном слое полотна диска турбины (материал диска - никелевый сплав ХН77ТЮР, глубина резания 0,5 мм, подача на оборот 0,09 мм; R - радиус диска, на котором измерялись напряжения; 1,2,3 - тангенциальные напряжения σ_ϕ; 4, 5, 6 - радиальные напряжения σ_r). Видно, что после точения в тангенциальном направлении формируются только растягивающие напряжения, хотя процесс резания и по скорости, а следовательно, и по температуре колебался в широких пределах. В радиальном направлении обнаружен переход от сжимающих напряжений, формируемых при низких скоростях (температурах), в растягивающие. Переход сжимающих радиальных напряжений в растягивающие осуществляется при температуре 600°С, именно при этой температуре обнаружено равенство температурных напряжений и предела текучести $\sigma_{0.2}$, что свидетельствует о начале протекания термопластических деформаций. Таким образом, установлено, что термопластические деформации приводят к формированию напряжений растяжения во всех направлениях, в то время как ниже температуры начала термопластических деформаций в тангенциальном направлении формируются растягивающие напряже ния, в радиальном - сжимающие.

При обработке дисков при постоянной скорости резания наблюдается стабилизации напряжений по всему полотну диска (рис. 7.25). При обработке малопластичных металлов, например, титановых сплавов, в первом горизонте в обоих направлениях формируются только сжимающие напряжения. Обнаружены отличия не только в знаке напряжений, но и в характере влияния скорости (температуры) резания на величину этих напряжений. Если при обработке никелевых сплавов с увеличением скорости резания наблюдается рост напряжений с последующим «насыщением» на

некоторой скорости, то в данном случае увеличение скорости приводит к снижению тангенциальных и радиальных сжимающих макронапряжений. Таким образом, не только метод обработки и технологические режимы, но и свойства обрабатываемого материала существенно влияют на механизм образования, величину и знак остаточных напряжений.

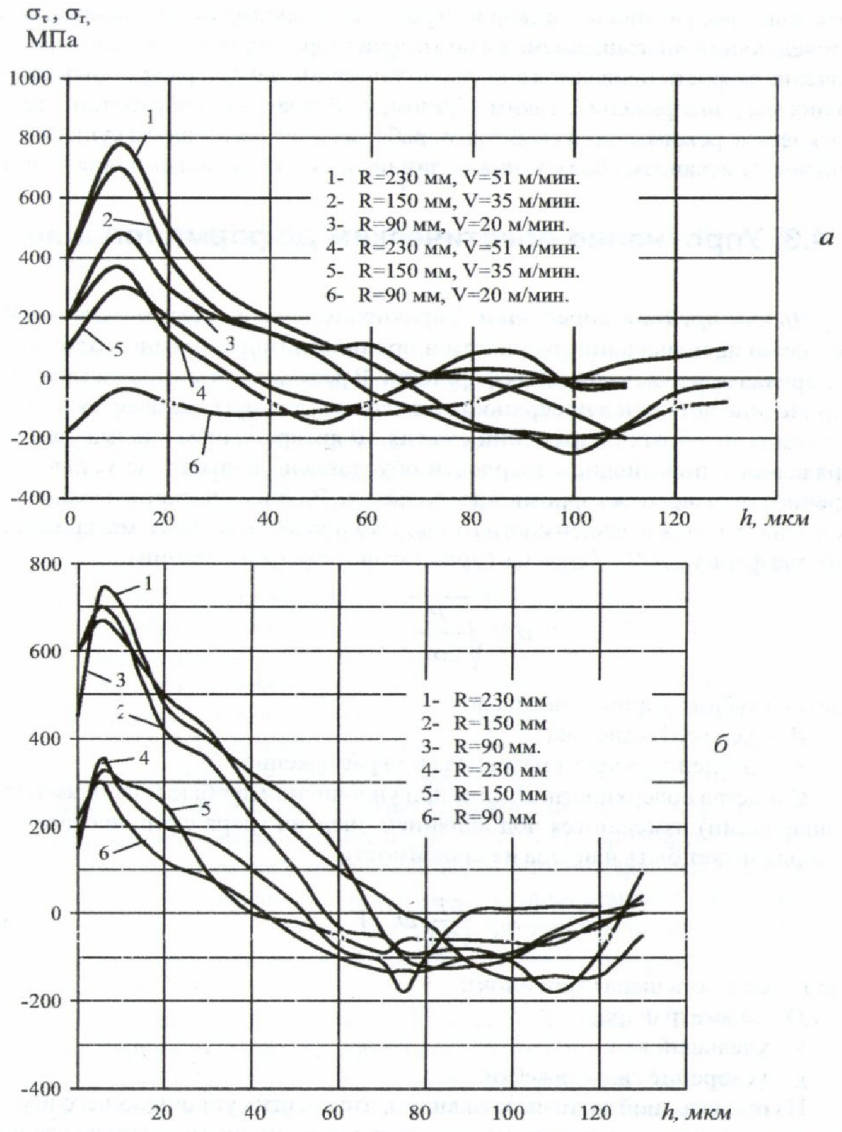


Рисунок 7.25 – Эпюры остаточных технологических напряжений на полотне диска турбины:

$\alpha - V \neq const, n = const; \delta - n \neq const, V = const$ (*пояснения в тексте*)

8. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

В целом комплексная проблема обеспечения заданных свойств поверхностей состоит из ряда задач. К числу наиболее важных можно отнести следующие:

а) разработка методов и конструкторско-технологических рекомендаций, позволяющих назначать свойства поверхностей по условиям эксплуатации деталей ГТД;

б) создание надежных технологических процессов, гарантирующих получение необходимых геометрических и физико-механических свойств поверхностей (при изготовлении и ремонте);

в) создание надежных и высокопроизводительных средств контроля свойств поверхностей на разных стадиях производства и эксплуатации изделий.

Применительно к частным вопросам некоторые из указанных задач решены. Например, виброобкатывание позволяет достаточно надежно получать требуемые параметры геометрии поверхности - высоту неровностей, опорную площадь и др. .

Применительно к жаропрочным сплавам установлено, что весь диапазон сочетаний температуры и ресурса эксплуатации деталей ГТД разделяется на три принципиально различные зоны. Каждой зоне соответствует свой вариант финишной технологии, обеспечивающий необходимые качественные показатели поверхностей.

Для формирования специальных свойств поверхностей деталей (механических, химических, магнитных, отражательных, электронных и др.), нанесения покрытий и плакирования в настоящее время в промышленности применяются различные способы. Классификация их имеет определенные трудности, так как технология формирования поверхностей обычно состоит из отдельных этапов с использованием различных физико-химических процессов (воздействие различной энергетической природы, превращений

энергий, изменения агрегатного состояния, превращений в веществе и др.). Дело усложняется тем, что в последнее время стали применяться комбинированные методы создания специальных поверхностей (например, деформационное упрочнение плюс поверхностное оплавление лучом лазера, ионное легирование плюс термическая обработка и др.). Вместе с тем большинство методов обработки поверхностей можно классифицировать по следующей схеме:

а) механические методы (методы, основанные на пластической деформации, например, ультразвуковое упрочнение дробью, упрочнение энергией взрыва, выглаживание, обкатка роликами и др.) ;

б) методы физико-химического модифицирования материала поверхностного слоя (например, лазерная обработка, ионная имплантация, цементация, ионное азотирование, термомагнитная и магнитно-флуктуационная обработка и др.);

в) методы нанесения покрытий (например, детонационное напыление, осаждение из паровой фазы, гальванические покрытия и др.);

г) плакирование в двух и многослойных комбинациях металл — металл, получаемых различными способами (например, плакирование взрывом, прессованием, прокаткой и др.;

д) комбинированные методы (например, обработка комбинированным инструментом, осуществляющим резание и деформационное упрочнение, ионная имплантация плюс вакуумно-плазменное нанесение покрытия и др.).

Нанесение поверхностных покрытий осуществляется капельным и атомным переносом. Процесс капельного переноса в значительной мере будет определять морфологию микроструктурных составляющих (в том числе морфологию пор), а процессы атомного переноса - несовершенства, характеризующие субмикроструктуру. Однако, независимо от используемой системы классификации, главным является выбор целесообразного метода обработки поверхности по условиям эксплуатации деталей (коррозионная среда, динамические нагрузки, условия трения и износа и др.). Для процессов

осаждения покрытий, например, на выбор метода влияют следующие факторы:

1) свойства материала, который предполагается нанести;

2) скорость осаждения;

3) ограничения, вносимые подложкой (например, максимально допустимый уровень температуры нагрева покрываемой детали);

4) величина адгезионной прочности сцепления покрытия к подложке;

5) затрачиваемая мощность;

6) требуемое оборудование и специальные средства технического обеспечения;

7) стоимость;

8) доступность (дефицитность) материалов;

9) экологические аспекты.

Как для конструктора машин, так и для технолога выбор и реализация на производстве метода обработки поверхности представляет собой сложную задачу. Для конструктора она сложна тем, что необходимо учесть множество разнопрофильных факторов: деталь должна быть технологичной, а, следовательно, надо учитывать быстроту технологического освоения и экономические аспекты; эксплуатационные условия - воздействие нагрузок (рабочих напряжений), коррозионной среды, ресурс, ремонтопригодность и т. д., вплоть до конечной стадии - утилизации машины. В задачу технолога, кроме выбора самого метода, входит реализация его на практике, обеспечение надежности процесса на всех его этапах (от стадии проектирования технологии до стабильного функционирования технологического оборудования); обеспечение заданных свойств поверхностей, объективный контроль качества и др. Все это необходимо обеспечить при минимальных трудо- и энергозатратах и материальных ресурсах.

В табл. 8.1 приведены основные методы создания специальных свойств поверхностей. Характеризуя приведенные данные, можно отметить, что для

деталей, эксплуатирующихся при нормальных температурах и динамических нагрузках, высокоэффективными и универсальными методами, повышающими, прежде всего усталостную прочность, являются методы поверхностного пластического деформирования (ГТПД). В случае дополни тельного воздействия агрессивной среды (например, для лопаток коми рессора ГТД, эксплуатирующихся в условиях морского климата) применяют дополнительные защитные покрытия, например, никелкадмирование, диффузионное алюмосилицирование, фосфатирование, покрыли нитридом титана и др.

Жаростойкость (окалиностойкость), износостойкость и сопротивление коррозии повышаются при нанесении на деталь металлических и неметаллических покрытий. Жаропрочность и ползучесть металлических материалов могут быть значительно повышены диффузионными покрытиями, ионной имплантацией и ионным осаждением, термомагнитной и магнитофлуктуационной обработкой.

Таблица 8.1 – Технологические методы и свойства поверхности

Физико-химическое воздействие на поверхность	Методы обработки	Материал детали	Шероховатость поверхности, классы	Толщина слоя, *мм*	Степень упрочнения в % или твердость	Остаточные напряжения максимальные, *МПа*	Изменения по точности	Цель обработки
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Поверхностное пластическое деформирование (ППД) упрочняющим инструментом	Дробеструйная стальными шариками, пневмогидродробеструйная, ультрозвуковая, микрошариками и др.	Чугуны, стали, сплавы на основе никеля, титана и др.	Ухудшается на 1-2 класса. Достигает 6÷9 классов	0,05÷1,0	10÷40	-(200÷900) -(200÷900)	Точность сохраняется	Повышение усталостной прочности
	Гидрогалтование	– « –	Обеспеч. 8÷9 кл.	0,05÷0,3	10÷30	-(200÷600)	Сохраняется	Повышение усталостной прочности, контактной жесткости, опорной площади, износостойкости
	Виброгалтование	– « –	– « –	– « –	– « –	– « –	– « –	
	Обкатка роликами	– « –	Обеспеч. 7÷11 кл	0,05÷1,0	20÷50	+200÷-900* -(200÷900)	– « –	

Продолжение таблицы 8.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Ударно-центробежное упрочнение	----«---	Обеспеч. 8÷9 кл	0,05÷0,3	10÷40	-200÷500	---«---	---«---
	Алмазное выглаживание	---«---	Обеспеч. 7÷11 кл.	0,1÷0,5	10÷50	+100÷-500* -(200÷700)	---«---	---«---
	Вибрационное обкатывание	---«---	Обеспеч. 6÷8 кл.	0,1÷0,6	5÷30	-(100÷500)	---«---	Повышение износо-стойкости, опорной площади, герметич-ности, декор. свойств и др.
Поверхностное пластическое деформирование режущим инструментом	Финишные операции токарной обработки	Стали, сплавы на основе титана, никеля и др.	Достигает 7÷11 кл	0,03÷0,25	5÷30	+500÷+800* -400÷+700	Дости-гается точность 6÷9 кл	При опти-мальных режимах обработки и высокотем-пературной эксплуатации повышение длительной
								и усталост-ной проч-ности, корро-зионной стойкости
	Финишные операции фрезерования	– « –	Достигает 7÷10 кл.	0,02÷0,5	5÷35	-100÷+600* -100÷+400	Дости-гается точность 6÷9 кл	– « –
	Финишные операции абразивной обработки (исключая отделочные)	– « –	-	0,01÷0,15	5÷25	-300÷+600* -400÷+500	-	Повышение износо-стойкости, усталостной прочности
	Отделочные операции (полирование, механическое суперфиниширование, хонингование и др.)	Стали, сплавы на основе титана, никеля и др.	Достигается 12÷13	0,005÷0,07	2÷15	+150÷-600* -100÷-600	Дости-гается 6÷7 кл.	Повышение износо-стойкости, коррозион-ной стой-кости,

Продолжение таблицы 8.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
								опорной площади, герметичности, декоративных свойств, снижение аэрогидродинамических потерь
Высокоскоростное пластическое деформирование	Упрочнение энергией взрыва	Стали, сплавы	Обеспеч. 7÷11 кл.	0,5÷30	15÷50	Сжимающие	-	Повышение усталостной прочности, износостойкости
Комбинированные методы поверхностного пластического деформирования	Одновременная обработка инструментом с режущими и упрочняющими кромками	Чугуны, стали, сплавы	Обеспечивается 4÷7 кл.	0,05÷0,5	10÷40	-300÷+500* -500÷+200	Достигается 8 кл.	Повышение твердости, износостойкости усталостной прочности
	Методы механической обработки со снятием стружки плюс ППД, например:							
	Шлифование +ППД	– « –	Обеспечивается 6÷11	0,05÷0,5	10÷40	+100÷-600* -200÷-700	Сохраняется	Повышение усталостной прочности
	Шлифование+ виброобкатывание	– « –	Обеспечивается 6÷8 кл.	0,1÷0,5	5÷30	-500÷+400	Сохраняется	Увеличение маслоемкости поверхности, повышение износостойкости, герметичности декоративных свойств

Продолжение таблицы 8.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Комбинированные методы поверхностного термомеханического или механотермического воздействия	Механическая обработка (резание, ППД) плюс тепловая (в печи, электронным лучом, лучом лазера и др.) или пластическая деформация при определенной температуре	Стали, сплавы	Не изменяется	0,1÷1,0	HRC 40÷70	Сжимающие напряжения	Сохраняется	Повышение длительной и усталостной прочности при нормальной и повышенной температуре, износостойкости, коррозионной стойкости
Термическая обработка поверхности	Закалка с нагревом токами высокой частоты	Стали	Не изменяется	0,2÷10	HRC40÷70	-300÷-800	Ухудшается вследствие коробления	Повышение износостойкости
	Закалка с нагревом газовым	Стали	Ухудшается на 1 кл.	0,5÷10	HRC40÷70	-300÷-800	– « –	– « –
Диффузионное покрытие								
а) металлоподобные (карбидные, нитридные, карбонитридные, боридные, силицидные)	Цементация	Малоуглеродистые стали	Ухудшается на 1 кл.	0,5÷2,0	HRC60÷70	-400÷-800	Ухудшается вследствие коробления	Повышение износостойкости
	Азотирование	Стали, чугуны	– « –	0,05÷0,6	HV 650÷1100	-400÷-800	– « –	– « –
	Цианирование	Стали	Не изменяется	0,01÷0,5	HRC60÷75	-400÷+800	– « –	– « –
	Нитроцементация	Стали	– « –	0,015÷1,0	HRC 60÷75	-400÷-800	– « –	Повышение износостойкости, коррозионной стойкости, кавитационной

Продолжение таблицы 8.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
								прочности
	Борирование	Стали, сплавы, тугоплавкие металлы	Не изменяется	0,1÷0,35	НМ 2250÷3250	-	-	Повышение жаростойкости, износостойкости, коррозионной стойкости
	Силицирование	– « –	– « –	0,05÷0,20	НМ 1000÷1250	-	-	Повышение жаростойкости
б)интерметаллидные (хромидные, алюмидные, титанидные	Хромирование	Стали, чугуны, тугоплавкие металлы, сплавы	Ухудшается на 1-2 кл.	0,2÷0,3	НМ 1600÷2000	Напряжения в слое растягивающие	Коробление тонкостенных деталей	Повышение износо- и коррозионной стойкости
	Алитирование	Стали, чугуны, тугоплавкие металлы, сплавы	Ухудшается на 1-2 кл.	0,05÷0,50	-	-	Коробление тонкостенных деталей	Повышение износо- и коррозионной стойкости
	Титанирование		– « –	0,05÷0,30	НМ 2500÷4000	-	– « –	Повышение сопротивления коррозии, кавитации, износу
Покрытия из металлов, сплавов, керамики, наносимые:	Газопламенное	Металлы и неметаллические материалы	Ухудшается, формируется грубая поверхность	0,3÷15,0 и более	НВ120÷420	-	-	Повышение жаро-, изно-со- и коррозионной стойкости
а)напылением (металлизация)	Плазменное	Стали, чугуны, сплавы	– « –	0,3÷20	НВ 500÷2000 и более	-	Коробление деталей	– « –
	электродуговое	– « –	– « –	1,3÷15	-	-	– « –	– « –

Продолжение таблицы 8.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
								ратурах и ударных нагрузках
	Высокочастотное индукционное	– « —	– « –	0,3÷0,5	-	-	– « –	Повышение жаростойкости, износостойкости
б) наплавкой	Электродуговая, газовая (ручная, механизированная)	Стали, чугуны, сплавы	Формируется грубая поверхность	0,5÷40 2,0÷4	НВ200÷450	+100÷+500	Значительное искажение формы	Повышение износо- и коррозионной стойкости
	Электрошлаковая	– « –	–« –	2,0÷40	НВ500÷650	+100÷+500	– « –	– « –
	Вибродуговая	– « –	– « –	0,3÷3,0	НВ500÷650	+100÷+500	Незнач. коробление	– « –
в)электролитически	Хромирование	Стали, чугуны, сплавы	Обеспечивает 6÷8 кл.	0,1÷1,0	НВ 500÷1200	Напряжение растяжения	Сохраняется	Повышение износостойкости
	Твердое никелирование	– « –	– « –	0,05÷2,0	НВ500÷650	-	Сохраняется	– « –
	Борирование	Стали	Обеспечивает 4÷7 кл.	0,1÷0,3	HV2200	-	– « –	– « –
	Железнение	Стали, сплавы	Обеспечивает 3÷5 кл.	0,2÷5,0	НВ120÷600	-	– « –	Повышение коррозионно- и износостойкости
	Оксидирование глубокое	Алюминий и его сплавы	-	0,01÷0,2	НМ 400÷450	-	– « –	– « –
г)химически	Никелирование, хромирование, покрытие кобальтом	Стали, сплавы, чугуны	Обеспечивает 6÷10 кл	0,01÷0,3	НМ 800÷950	-	Сохраняется	– « –
д)электрофоритически	Покрытия из металла, керамики, пластмасс, лаков, красок	Металлы, керамика, пластмассы	Не изменяется	0,1÷5,0 и более	-	-	Без изменения формы	Повышение коррозионно- и износостойкости

Продолжение таблицы 8.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
е) осаждение покрытий из паровой фазы в вакууме	Покрытия из металлов	Стали, сплавы	Не изменяется	0,01÷0,1	-	Могут формироваться напряжения растяжения	Не изменяется	Повышение твердости, износо- и коррозионной стойкости
Нанесение покрытий из неметаллических материалов	Эмалирование	Стали, чугуны	3÷5 кл.	0,05÷0,3	-	-	– « –	Повышение жаростойкости
	Покрытие пластмассами и другими спец.материалами	Металлы и неметаллы	-	0,15÷0,3	-	-	– « –	Защита от коррозии
Плакирование	Методы комбинированного литья, пакетной прокатки, гидравлического прессования, плакирования взрывом, прокатки порошковых материалов и др.	Пары: Al +стали; Al+Ti; Хромоникелевые стали плюс стали, сплавы на основе Ti, Al, Mo, Ta, Ni и др.	-	Толщина плакированного покрытия: 0,1÷1,0	Твердость определяется свойствами плакированного металла	-	-	Повышение прочности, износостойкости, коррозионной стойкости
Легирование бомбардировкой ионами	Ионная имплантация	Стали, сплавы на основе железа, алюминия, титана, никеля	Практически не изменяется	0,001÷0,010	0÷40	Растяжения или сжатия в зависимости от типа ионов	Сохраняется	Повышение сопротивления износу, усталостной долговечности, антифрикционных и антикоррозионных свойств
Травление	Химическое, электрохимическое травление	Металлы, сплавы	Ухудшается на 1 кл.	Удаление слоя 0,05÷0,5	-	-	Несколько ухудшается	Удаление наклепанного слоя
Высокочастотное ионное полирование	Высокочастотное ионное полирование	металлы	Улучшается на 1-2 кл	-	-	-	Сохраняется	Повышение усталостной прочности, коррозионной стойкости

Окончание таблицы 8.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Комбинированные физико-химические методы	Лазерная+криогенная обработка; покрытие+лазерная обработка; ППД+лазерная обработка; ионное легирование+термообр. и др.	Металлы, сплавы	-	0,001÷ 1,0	HRC=70 и более	Напряжения растяжения или сжатия	-	Повышение длительной и усталостной прочности, износо- и коррозионной стойкости, твердости и др.
Обработка в магнитном поле	Магнитно-флуктуационное модифицирование поверхности и детали в целом (с эффектом пластификации)	Стали и сплавы на основе железа, никеля, титана и др.	Сохраняется	В большинстве случаев объемное уточнение	Сохраняются или несколько увеличиваются (3-5%)	Сохраняются	Сохраняются	Повышение прочности, жаропрочности, износо-стойкости и др.

Значительное повышение тепло- и коррозионной стойкости достигается также плазменным напылением (на воздухе и в вакууме).

Для деталей, работающих в условиях высоких ударных нагрузок, трения и воздушной агрессивной среды может быть рекомендован перспективный метод детонационного напыления.

Надо отметить, что приведенные в табл. 8.1 методы не в одинаковой степени разработаны и апробированы в производстве. В значительной мере исследованы и достаточно широко внедрены в двигателестроении методы ППД, в том числе в сочетании с термической обработкой. Проблемными здесь остаются лишь вопросы температурного и ресурсного порогов применимости методов. Вопрос о том, до какой эксплуатационной температуры и при какой длительности ресурса возможно эффективное применение методов ППД для конкретного материала, можно решить только на основе комплексно поставленных исследований длительной прочности и релаксационных процессов в поверхностном слое.

Достаточно глубоко исследованы и получили широкое промышленное внедрение химико-термические и гальванические методы обработки поверхности. Такие методы, как плазменное нанесение покрытий, ионная имплантация и магнитная обработка, ионное азотирование и др. не получили пока широкого распространения в промышленности, хотя, как показывают данные, возможности этих методов настолько широки, что они могут обеспечить поверхности с уникальными свойствами. Этим методам следует уделить наибольшее внимание, как в области исследования, так и промышленного внедрения.

С определённой степенью правомерности большинство технологических методов по обеспечению заданных свойств поверхностного слоя можно классифицировать следующим образом:

8.1 Методы поверхностного пластического деформирования (ППД)

- Алмазное выглаживание.
- Обкатывание и раскатывание шариком и роликом.
- Обработка дробью.
- Дорнование.
- Виброгалтование.

8.2 Финишные методы

- Обработка алмазным инструментом.
- Турбоабразивная обработка.
- Шлифование сизалевыми кругами с абразивными пастами.

8.3 Термообработка

- Закалка.
- Отжиг.
- Термопластичное упрочнение.

8.4 Легирование

8.4.1 Диффузионное насыщение металлами

- цементация (C);
- азотирование (N);

- цианирование (C+N);

- алитирование (Al);

8.4.2 Поверхностное плавление с введением необходимых компонентов

- лазерное легирование;

- плазменное легирование.

8.5 Покрытия

8.5.1 Упрочнение пластическим деформированием

Дробеструйная обработка. Упрочнение поверхности методами ППД основано на повышении твердости и прочности (при снижении плотности) материала при пластической деформации. В результате взаимодействия сил в сердцевине детали и в поверхностном слое последней оказывается под действием остаточных напряжений сжатия. Формированием сжимающих напряжений и повышением твердости обусловлено повышение усталостной прочности, износо- и коррозионностойкости. В основу расчетов глубины упрочненного слоя в зависимости от свойств обрабатываемого материала положена формула С.Г. Хейфеца (при статическом вдавливании)

$$a = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}}$$

где а - глубина упрочненного слоя;

Р - усилие Пуансона;

σ_{τ} -предел текучести материала при растяжении.

Свойства поверхностного слоя при упрочнении дробью (шариками, микрошариками) изменяются под влиянием энергии удара сферического тела, которая может быть найдена из зависимости

$$A = \frac{\pi\gamma}{12g} D^2 V^2,$$

где V-скорость шара (дробинок);

D - диаметр шара;

у - удельный вес;

g - ускорение силы тяжести.

Из приведенной зависимости видно, что энергия упрочняющего шарика (дробинки) определяется его массой, скоростью, пропорциональна удельному весу; видно также, что с увеличением скорости энергия удара возрастает в квадрате, а с увеличением диаметра дроби - в кубе.

Теоретически взаимосвязь между величиной упрочненного слоя и технологическими факторами в условиях динамического нагружения определяется формулой

$$a = k\frac{Dv*Sin\alpha}{\sqrt{H_{дип}}},$$

где α - угол атаки (угол падения дроби по отношению к обрабатываемой поверхности);

k - коэффициент пропорциональности;

- динамическая твердость.

Деформационное упрочнение пластическим деформированием - одно из наиболее изученных направлений в технологии машиностроения. Большой вклад в разработку теории и практических основ упрочнения внесли И.В. Кудрявцев, И. А. Одинг, Э.А. Сатель и др.

Выбор метода деформационного упрочнения зависит от марки обрабатываемого материала, требований к свойствам поверхностного слоя, форме и размерам детали и эксплуатационным условиям.

Дробеструйная обработка выполняется в пневмо-, гидро- и пневмогидродробеструйных установках. В основе процесса лежит пластическое деформирование поверхностного слоя под действием кинетической энергии потока дроби (стальных шариков).

Известно, что такие конструктивные концентраторы напряжений, как отверстия, радиусы переходов, канавки, галтели и др., резко снижают усталостную прочность. Эффективность дробеструйного упрочнения как средства повышения сопротивления усталости зависит от глубины упрочненного слоя и определяется кинетической энергией дроби и

длительностью обработки. В результате ударного воздействия сферических тел (шариков, дроби) поверхность детали покрывается многочисленными лунками-кратерами, которые, в целом ухудшая шероховатость поверхности, одновременно упрочняют поверхностный слой и устраняют поверхностные дефекты от механической обработки в виде царапин, рисок, наплывов, вырывов, шлифовочных трещин, прижогов и др.Принцип действия установок для пневмо- и гидродробеструйной обработки основан на эжекции. Подобные установки широко применяются для поверхностного упрочнения пера лопаток компрессора. Детали закрепленные на валу совершают вращательное (10÷50 об/мин) и возвратно-поступа- тельное (10÷100 мм/мин) движения относительно форсунок. Форсунки эжек- торного типа расположены под обрабатываемой деталью на расстоянии 100÷300 мм от оси вращения деталей. При давлении воздуха $\approx 10^5$ Па в пневмогидродробеструйных установках или смазывающе-охлажлающей жидкости (СОЖ) в гидродробеструйных установках в эжекторе создается разрежение. В результате этого стальная дробь вместе с СОЖ через заборные окна попадает в сопло и под давлением направляется на деталь. Камера разделена на две части специальной сеткой, которая отфильтровывает изношенные шарики. В подавляющем большинстве случаев шероховатость поверхности стальных лопаток и лопаток из титановых сплавов при обработке шариками из стали И1Х15 диаметром 1,6-:-2 мм улучшается на один класс. В случае же применения пневмогидродробеструйной обработки стальной литой дробью (ДСЛ) шероховатость ухудшается на 1-2 класса.

Основными параметрами рассматриваемого метода являются давление воздуха (или СОЖ), материал и размер шариков, расстояние обрабатываемой летали от среза сопла, удельная загрузка шариков в камеру Обрабатываются детали из алюминиевых, титановых сплавов и стали, такие как шестерни, цапфы, диски, валы, трубопроводы, кронштейны, балки. Максимальные габариты упрочняемых деталей достигают 600х2500 мм.

Виброгалтование. Этот процесс осуществляется на инерционных дисбалансных установках. Контейнер совершает возвратно-поступательные движения в двух или трех плоскостях. В контейнере устанавливается приспособление (в виде ротора), в которое крепятся детали. Контейнер наполняется рабочей жидкостью и шариками. Вибрации возникают при вращении вала, на котором установлены дисбалансные грузы. Перемещающиеся стальные шарики, ударяясь о поверхность детали, пластически деформируют ее, упрочняют и сглаживают неровности.

Виброгалтование широко применяется при упрочнении деталей типа лопатка компрессора, сепараторы подшипников, диски компрессора, шестерни и др. Например, для стальных лопаток компрессора применяют следующие режимы обработки: амплитуды колебаний — вертикальная 2÷4 мм, осевая 0,1÷0,2 мм, боковая 1,0÷1,5 мм; частота колебаний 15÷30 Гц; продолжительность обработки 1+4 ч; осуществляется реверсирование двигателя вибратора через определенные промежутки времени. Достигаемая шероховатость поверхности соответствует девятому классу *(Ra*=0,32÷0,16 мкм). В промышленности известны установки, на которых одновременно обрабатывают до 200 лопаток компрессора с длиной пера 50÷100 мм.

Гидрогалтование. Поверхностное деформационное упрочнение методом гидрогалтования основано па механическом воздействии рабочего тела (стальная дробь и масло) на обрабатываемую поверхность при их соударении. Существует несколько разновидностей установок, позволяющих одновременно обрабатывать до 30 деталей - лопаток. Установки снабжены несколькими приводами для вращения деталей вокруг своей оси, вращения ротора-дробемета, подачи рабочей смеси. Дробь вместе с маслом, попадая на лопасти быстро вращающегося ротора-дробемета, направляются налетали. Удары шариков воспринимаются поверхностью детали через жидкостную пленку; этим достигается смазывающс-охлаждающий эффект при обработке. Для каждой марки обрабатываемого материала оптимальный режим упрочнения гидрогалтованием устанавливается экспериментально (с

анализом шероховатости, глубины и степени упрочнения, величины и знака остаточных напряжений и др.). Например, упрочнение лопаток компрессора из сплава ВТ3-1 осуществляют при следующих условиях: частота вращения дробемет- ного колеса - 450 об/мин, диаметр шариков 0,6÷1,2 мм, масло марки МС-20, время обработки 30 мин. Обеспечивается 8-9 классы шероховатости.

Ультразвуковое упрочнение. Отличительной особенностью метода является то, что механическое колебание рабочего тела (шариков) осуществляется за счет магнитострикционного преобразователя электрических колебаний. Основным элементом установки является магнитострикционный преобразователь электрических колебаний в механические, колебания которого передаются на концентратор (преобразователь колебаний). Задающим источником колебаний является ультразвуковой генератор. Концентратор имеет рабочие камеры, в которых помещаются детали и рабочее тело. Энергия механических колебаний концентратора ультразвуковой частоты передается шарикам; последние, соударясь со стенками детали, упрочняют поверхность. Обрабатываются, как правило, окончательно готовые детали шариками диаметром 1÷3 мм, смачиваемыми эмульсией. Необходимая степень деформационного упрочнения обеспечивается подбором продолжительности обработки, диаметра шариков, расстояния детали до стенок концентратора.

Упрочнение микрошариками. Данный метод нашел широкое применение в случаях упрочнения тонкостенных деталей, маложестких деталей сложной формы,.с тонкими кромками, глубокими пазами, малыми радиусами переходов и др. Диаметр шариков - 25÷200 мкм; достигаются 8-9 классы шероховатости; в тонком поверхностном слое формируются сжимающие напряжения. Конструктивно установки для упрочнения микрошариками выполняются аналогично установкам для гидрогалтования. На промышленных установках типа УДМ-3 частота вращения ротора дробемета составляет 3600мин$^{-1}$, расстояние до упрочняемой детали 150 мм,

время упрочнения 10÷60 с. Уменьшение диаметра шариков ухудшает шероховатость поверхности.

Упрочнение обкатыванием. Процесс обработки обкатыванием осуществляется перемещением по поверхности детали инструмента в виде ролика или шарика под определенным давлением (рис. 8.1). Цель обкатывания - повысить усталостную прочность. Применяют упрочняющие и упрочняющее-сглаживающие режимы обработки. Цель упрочняющих - получить наибольшее по глубине и степени упрочнение; цель упрочняюще-сглаживающих - достижение высокого класса шероховатости (до 11 -го класса).

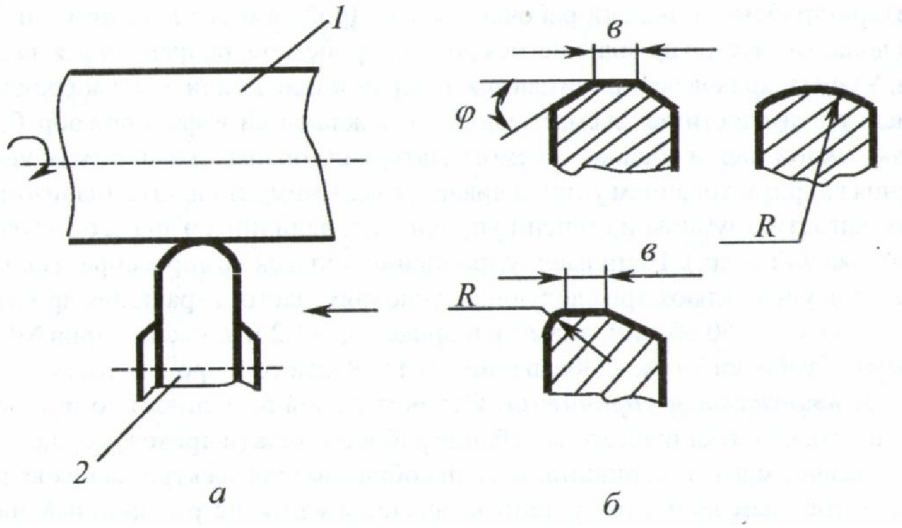


Рисунок 8.1 - Схема обкатывания (а) и рабочие профили роликов (б):
1- обрабатываемая модель; 2 – инструмент (ролик)

Приспособления могут иметь механический или пневмогидравлический привод. Диаметр ролика рекомендуется выбирать из зависимости

$$0{,}5 < \frac{D_p}{d} < 5$$

где D_p - диаметр ролика; d— диаметр детали.

Радиус рабочего профиля R составляет (0,5÷0,75) D_p. При этом надо учитывать, что чем меньше D_p и R, тем больше глубина деформационного упрочнения и выше шероховатость поверхности. Ролики изготовляют из инструментальных сталей, обеспечивающих получение твердости не ниже

HRC 60. Выбор режимов обкатки (давление, подача, скорость, число проходов, смазываюше-охлаждающая технологическая среда (СОТС) и др.) и геометрии инструмента определяют интенсивность, качество упрочнения и технико-экономические показатели.

Упрочнение раскатывание. По принципу исполнения, технологическим режимам, инструментам и др. процессы обкатывания и раскатывания близки. В последнем случае основным фактором, определяющим возможность применения раскатывания, является диаметр отверстия. Как правило, он должен быть не менее 30 мм.

Раскатывание применяют после получистового и чистового растачивания с припуском не более 0,2 мм на диаметр, при этом уже за один проход улучшается на 2-3 класса шероховатость поверхности. Жесткие инструменты-раскатники обеспечивают точность обработки в пределах 5-8-го квалитетов, шероховатость - 9-11 -го классов. Упругие раскатники, не изменяя точности, обеспечивают шероховатость 9-11 класса. Раскатывание производят на токарных, расточных или сверлильных станках; частота вращения шпинделя колеблется в пределах 100÷400 мин$^{-1}$; подача 0,1÷0,3 мм/об, число проходов 1÷2, СОТС - масло индустриальное, натяг 0,01÷0,15 (разность диаметра инструмента и отверстия до обработки). Применение раскатывания целесообразно во всех видах производств; это обусловлено тем, что упрочнение детали, достижение требуемой точности и класса чистоты осуществляются при меньших затратах, чем при других видах обработки. Раскатывание роликами и шариками успешно применяют при обработке корпусных деталей агрегатов, гидро-и пневмоцилиндров, цилиндров двигателей, плунжерных пар и других деталей.

В случае малых диаметров, когда раскатывание применить невозможно, применяют способ дорнования: через отверстие протягивают инструмент в виде шара или дорна Диаметр инструмента несколько больше диаметра детали. Основным параметром, определяющим процесс обработки, является натяг. Величины натяга зависят от материала и конструкции детали,

величины требуемого упрочнения, конструкции инструмента. Обработка отверстий шариком обеспечивает 11-й класс шероховатости при 5-7-м квалитете точности и степени упрочнения до 60%. В качестве СОТС применяют индустриальные смазки; скорость дорнования колеблется в пределах 2+8 м/мин. Дорнование является высокопроизводительным процессом, обеспечивающим высокое качество поверхностей и повышение долговечности деталей в 1,5-2 раза.

Алмазное *выглаживание.* При упрочнении деталей с цилиндрическими поверхностями наиболее целесообразным является метод алмазного выглаживания. В этом случае деформирующим инструментом является кристалл алмаза, закрепленный в специальной оправке пайкой серебряным припоем. Универсальный выглаживатель (рис. 8.2) состоит из оправки 1 и алмаза 2. Упругий контакт при обработке создается тарированной пружиной приспособления. Выглаживание осуществляется в условиях трения скольжения, что существенно отличает этот процесс от обкатывания. Высокая твердость алмаза, низкий коэффициент т рения по металлу, высокий класс чистоты поверхности алмаза позволяют получать поверхности деталей с зеркальным блеском и высокой точностью. Выглаживание осуществляется с малыми общими усилиями (50÷300Н), что позволяет упрочнять тонкостенные детали. Процесс алмазного выглаживания не требует припуска, так как изменение диаметра незначительно и не превышает 0,005 мм.

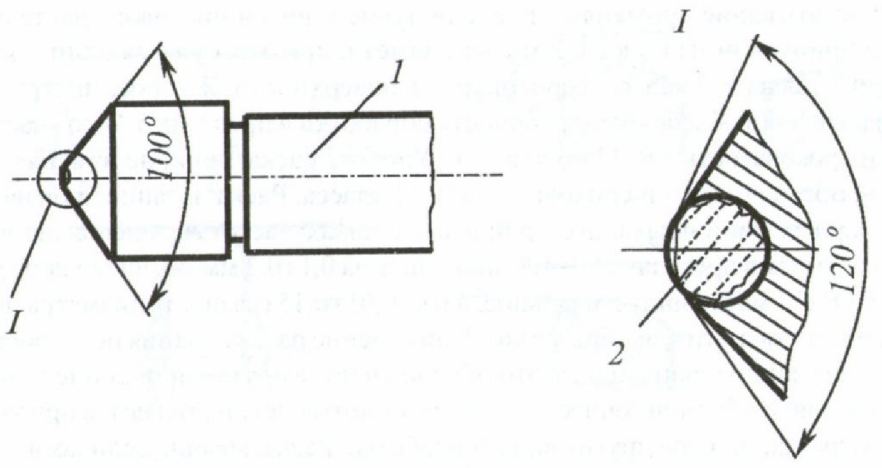


Рисунок 8.2 – Алмазный выглаживатель (пояснения в тексте)

В качестве примера можно привести следующие условия деформационного упрочнения сталей, медных сплавов: радиус сферы наконечника 0,5÷3,5 мм, радиальное усилие 100-250 Н, скорость выглаживания 40÷200 м/мин, подача 0,03÷0,1 мм/об, количество проходов 1÷2, СОТС - масло веретенное. Выглаживание реализуется на универсальных токарно-винторезных станках с помощью несложных приспособлений. В результате выглаживания достигаются следующие свойства поверхностей: R_a - 0,03÷0,04 мкм; квалитет точности 5÷7, твердость повышается на 40÷60%, формируются сжимающие напряжения. Упрочняется широкая номенклатура деталей и материалов: шпиндельные узлы высокоточных станков, беговые дорожки подшипников, гильзы, ролики подшипников, поршни, золотники, валы (стали 45, 20Х, 40Х, 35ХН, ЗОХГСА, ШХ15, 40ХНМА, бронзы, алюминиевые сплавы и др.). Алмазному выглаживанию подвергаются также покрытия (хромовые, никелевые и др.).

Упрочнение энергией взрыва. Высокоскоростное импульсное воздействие на поверхность по своему механизму значительно отличается от обычных методов упрочнения. Высокая скорость деформации и локальные температуры вызывают структурно-фазовые превращения в обрабатываемой поверхности; это повышает эффективность деформационного упрочнения. Для упрочнения взрывом используют заряды взрывчатого вещества различной формы; форма заряда определяет форму ударной волны. Для получения основного заряда иногда используют детонирующие шнуры, укладываемые по форме детали. Такие заряды обеспечивают скорость детонационной волны не менее 6500 м/с

Для регулирования давления и продолжительности импульса выбирается соответствующая среда (воздух, вода и др.). В подавляющем числе случаев лучшей средой оказывается вода, которая хорошо поглощает ударную волну и растворяет продукты распада взрывчатых веществ.

Энергией взрыва возможно упрочнение тонких поверхностных слоев деталей сложной формы. Например, упрочнение замков лопаток из жаропрочного никелевого сплава детонирующим шнуром в воде повысило твердость на 17% при толщине упрочненного слоя 1 мм.

8.5.2 Финишные методы обработки

8.5.2.1 Обработка алмазными инструментами

1. Шлифование алмазными кругами.

- Ra=0,63…0,025 мкм;

- расход инструмента уменьшается в 15-20 раз.

Для плоских поверхностей эта обработка позволяет повысить контактную жёсткость на 20%, по сравнению с абразивным шлифованием.

2. Алмазное хонингование.

- Ra=0,63…0,04 мкм;

- некруглость формы 0,005-0,020 мм.

Это позволяет повысить износостойкость.

3. Алмазное развёртывание.

- Ra=0,25 мкм;

- T_{p-p}=0,0025 мм.

4. Обработка алмазными полировочными лентами.

Ra=0,25…0,025 мкм.

5. Доводка – притирка (съём металла производится алмазным порошком, который свободно распределён в пасте).

Ra=0,04…0,02 мкм;

T_{p-p}=0,0001…0,0003 мм.

8.5.2.2 Турбоабразивная обработка

Это есть обработка поверхности в кипящем слое (псевдоожиженном) абразива (рис. 8.3).

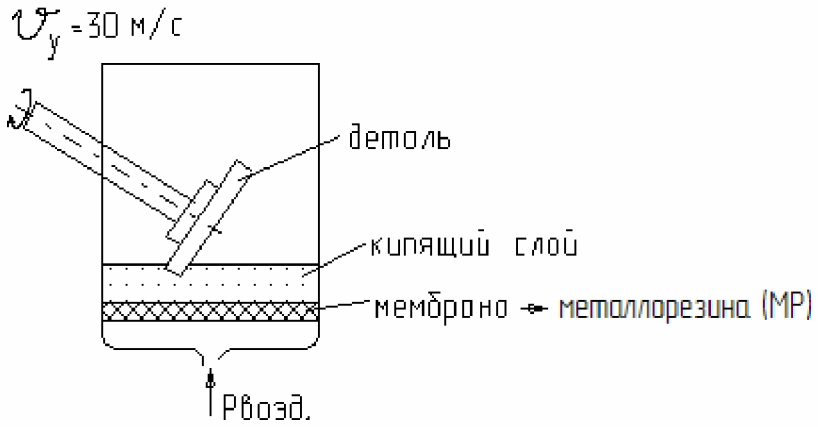


Рисунок 8.3 – Схема установки для турбоабразивной установки

Принципы турбоабразивной обработки: при соударении абразивных частиц с деталью происходит съём металла путём микрорезания и разрушения шероховатости.

Диск компрессора:ВТ9: Абразив – карбид кремния 63С 25/20; белый электрокорруну:24А 25/20

τ =10 мин. (реверс через 1,5 мин.)

r=0,3…0,5 мм

Ra=0,6…0,4 мкм ($Ra_{исх}$=2,5…1,5 мкм)

σ =-(190…270) МПа

h=0,005-0,01 мм.

Обрабатываются диски компрессора и турбины, промежуточные кольца и различные дефлекторы.

8.5.2.3 Полирование сизалевыми кругами

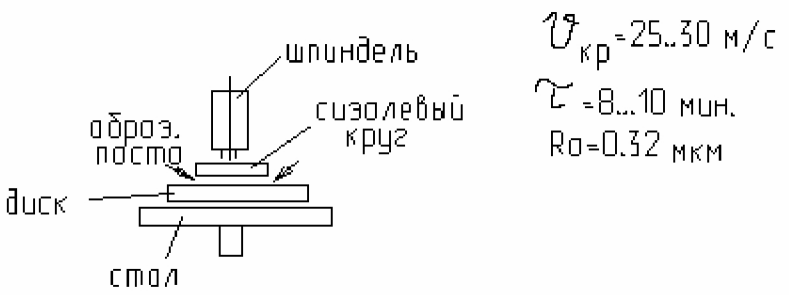


Рисунок 8.4 – Схема полирования диска

Возникновение в зоне низких температур не вызывают термопластичных деформаций, поэтому в поверхностном слое после полировки возникают остаточные напряжения сжатия:

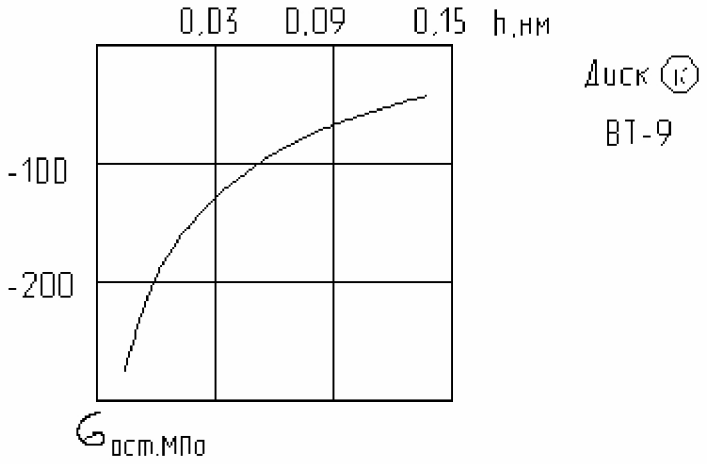


Рисунок 8.5 – Эпюра остаточных напряжений в поверхностном слое после полирования сизалевыми кругами

8.5.2.4 Термообработка

8.5.2.5 Отжиг

Используется применительно к лопаткам турбины из материала ЖС6КП.

Цель – снятие внутренних остаточных напряжений, ликвидация наклепа.

Отжиг осуществляется в среде защитного газа – аргона или в вакууме.

$t_{отж}$=950 °С, τ =2 часа.

8.5.2.6 Термопластичное упрочнение

Используется для лопаток турбины. Лопатка нагревается до определённой температуры и резко охлаждается. За счёт быстрого охлаждения в тонком поверхностном слое появляются временные растягивающие напряжения, которые приводят к пластичной деформации, а после полного охлаждения детали в поверхностном слое возникают остаточное напряженное поле сжатия.

Небольшая интенсивность деформации упрочнения способствует резкому уменьшению релаксационных процессов.

Пример; для лопаток из ЖС6ФН,подвергающимся термопластичным упрочнениям.

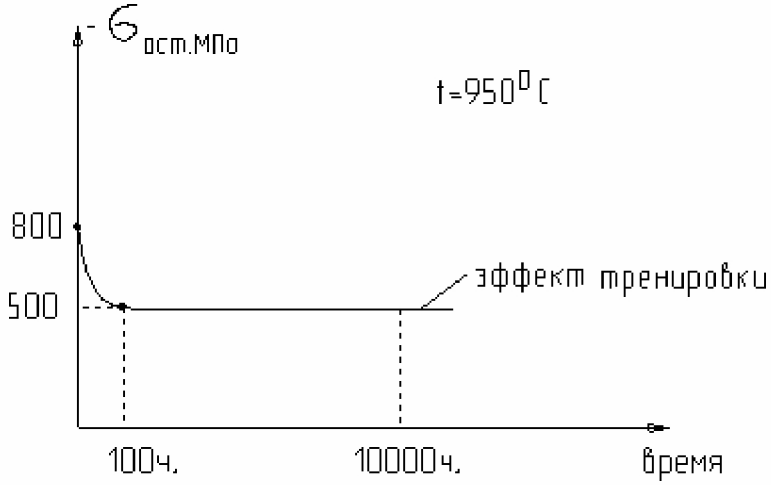


Рисунок 8.6 – Изменение уровня остаточных напряжений, полученных после термопластического уплотнения в зависимости от ресурса работы

Результаты показывают, что увеличивается усталость прочности σ_{-1}. Это объясняется тем, что остаточные напряжения в достаточной интенсивности увеличивают внутренние трения между фрагментами структуры металла и препятствуют продвижению в этом слое микроискажений. Этот слой играет роль барьера, препятствующий выходу на поверхность дислокаций с последующим образованием микротрещин. Это всё благоприятно сказывается на усталости прочности.

8.5.2.7 Поверхностное легирование

Поверхностным легированием называется целенаправленное изменение химического состава при поверхностных объемов металла для достижения тех или иных целей.

Оно осуществляется путем:

а) диффузионного насыщения металла из среды определенного состояния (ХТО);

б) поверхностного плавления с введением в этот слой необходимых компонентов (лазером, плазмой).

Поверхностное легирование имеет преимущество перед покрытиями, которые заключаются в исключительно высокой прочности сцепления с основой, так как граница между металлом и легированным слоем имеет диффузионный характер.

Операций ХТО достаточно много:

- цементация.

Цель – повышение износостойкости, эрозионной стойкости.

- азотирование.

Цель – повышение износостойкости, коррозионной стойкости и усталости прочности.

- борирование.

Цель – повышение коррозионной стойкости, твёрдости, износостойкости.

- силицирование.

Цель – повышение коррозионной стойкости и жаростойкости.

- алитирование.

Цель – повышение жаростойкости, коррозионной стойкости и сопротивление эрозии.

- меднение.

Цель – повышение коррозионной стойкости, амтифрикационных свойств (снижение коэффициента трения).

- фосфатирование.

Цель – повышение коррозионной стойкости, кислотостойкости.

- титанирование.

Цель – повышение коррозионной стойкости, жаростойкости для медных и алюминиевых сплавов.

8.5.2.8 Цементация

Это процесс диффузионного насыщения поверхности углеродом, который осуществляется при температуре t=930…950^{o}C, в сочетании с последующей закалкой и низким отпуском.

Длительность:

а) цементация 930...950^{o}C, τ = 8-10 часов;

б) отпуск высокий 650…680^{o}C, τ = 5-8 часов;

в) закалка 780...880^{o}C;

г) низкий отпуск 180…350^{o}C, τ = 2-3 часа.

Цементации подвергаются стали: 12Х2НЧА, 14ХГСН2МА, 12Х2НВФА, 20Х3МВФШ (стали с низким содержанием углерода $C \le 0{,}2\%$).

Процесс цементации может осуществляться в твёрдой среде (твёрдым карбюризатором: уголь в смеси с $BaCO_3$, Na_2CO_3, K_2CO_3), в газовой среде (окись углерода CO, CH_4, пропан, бутан), в жидкой среде (в расплавах солей Na_2CO_3 (10-15%), SiC (6-10%)).

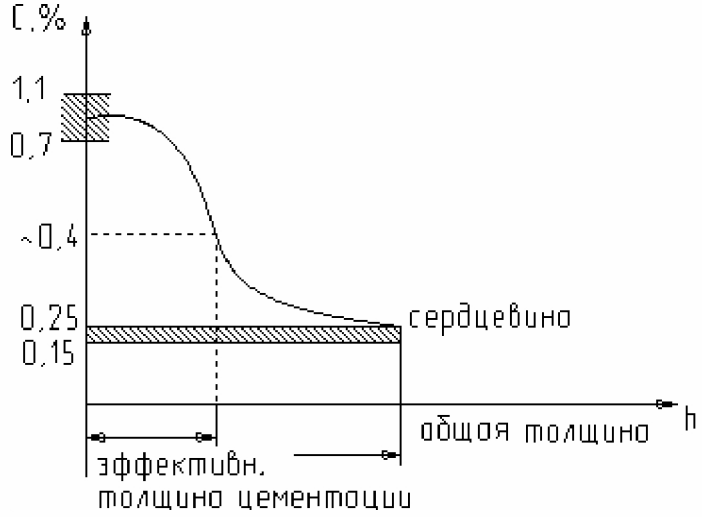


Рисунок 8.7 – Изменение содержания углерода в поверхностном слое при цементации

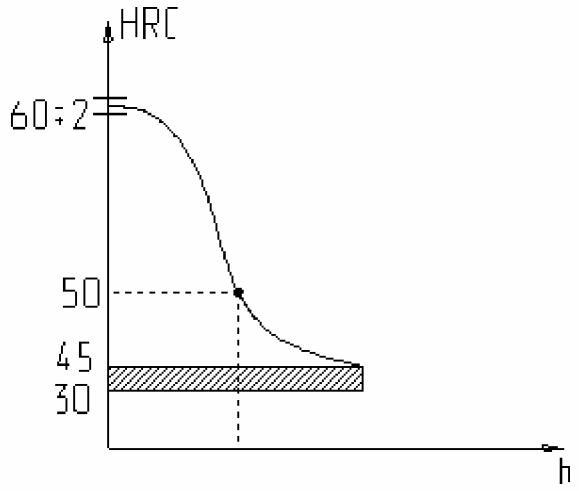


Рисунок 8.8 – Изменение твердости поверхности по глубине цементируемого слоя

Существенным недостатком процесса цементации является коробление детали, связанное с высокими температурами цементации. Поэтому в технологии после цементации вводят операцию восстановления баз путём шлифования цементируемой поверхности. Цементации подвергаются шестерни, валы, втулки.

8.5.2.9 Азотирование

Это насыщение поверхностного слоя стальной детали азотом в среде чистого аммиака или в смеси аммиака и азота. Процесс азотирования осуществляется при температуре t=500…580^{o}C, $\tau = 24…90$ часов, h=0,3…0,5 мм, твёрдость поверхностного слоя в 1,5-2 раза выше, чем при цементации. Для цементации HV=500, для азотирования HV=900…1000. Высокая твёрдость поверхности в этом случаи обеспечивается за счёт того, что атомарный азот, который диффундирует в поверхность стали, образует с железными и легированными элементами химические соединения – нитриды. Азотированию подвергаются стали: 38Х2МЮА, 30Х3МФ1, 35ХМЮА. Детали: гильзы цилиндров, клапаны поршневых двигателей, коленчатые валы.

8.5.2.10 Цианирование

Процесс одновременного насыщение азотом и углеродом. Цианирование осуществляется в твёрдой среде (твёрдый карбюризатор, $K_4Fe(CN)_6$ (30…40%) – жёлтая кровяная соль, Na_2CO_3

(10%), древесный уголь), в жидкой среде (расплавы солей NaCN, $Ca(CN)_2$), в газовой среде (нитроцементация, аммиак (2...6%), пропан). Нитроцементация: t=830…900^oC, h=0,6…0,8 мм, τ=6-8 часов.

Преимущества: меньшее коробление детали по сравнению с цементацией и приблизительно на 50% сокращает длительность процесса.

Материалы: сталь 20Х3МВФ-Ш.

Детали: шестерни.

8.5.2.11 Алитирование

Это получение алюминидных или совместно с другими элементами соединений с металлами путем насыщения из порошковых смесей с галлогинидными активаторами.

Рабочая среда – порошок FeCr, FeAl, FeSi – ферросплавы + Al_2O_3 + NH_4Cl.

t=1000…1100^oC, τ=2…6часов. При высоких температурах выделяются летучие хлористые соединения металлов, которые впоследствии диффундируют внутри детали.

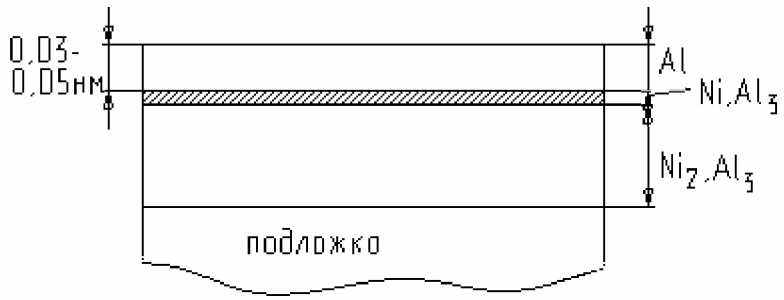


Рисунок 8.9 – Химический состав покрытия, полученного методом алитирования

Достоинства: хорошая сцепляемость с металлом.

Применяется для защиты от высокотемпературной газовой коррозии.

8.5.2.12 Лазерная технология обработки поверхностей

Лазерная обработка осуществляется путём сканирования поверхности лазерным лучом, при взаимодействии луча с поверхностью начинают осуществляться следующие процессы: оплавление, испарение, легирование и разложение фазового превращения.

Применительно к деталям авиационного двигателя при использовании лазера нашли применение два технологических направления:

1. лазерное упрочнение;
2. лазерное легирование.

Лазерное упрочнение. Кратковременное облучение поверхности обеспечивает глубокие проплавления 0,001 – 2 мм. При этом скорость охлаждения $10^5 \ldots 10^6$ к/с. При столь быстром затвердевании образуются аморфные структуры и пересыщенные фазы с ультракристаллической решёткой. Свойства таких структур значительно отличается от свойств металла поверхностного слоя по твёрдости и прочности, а это способствует повышению износостойкости и коррозионной стойкости.

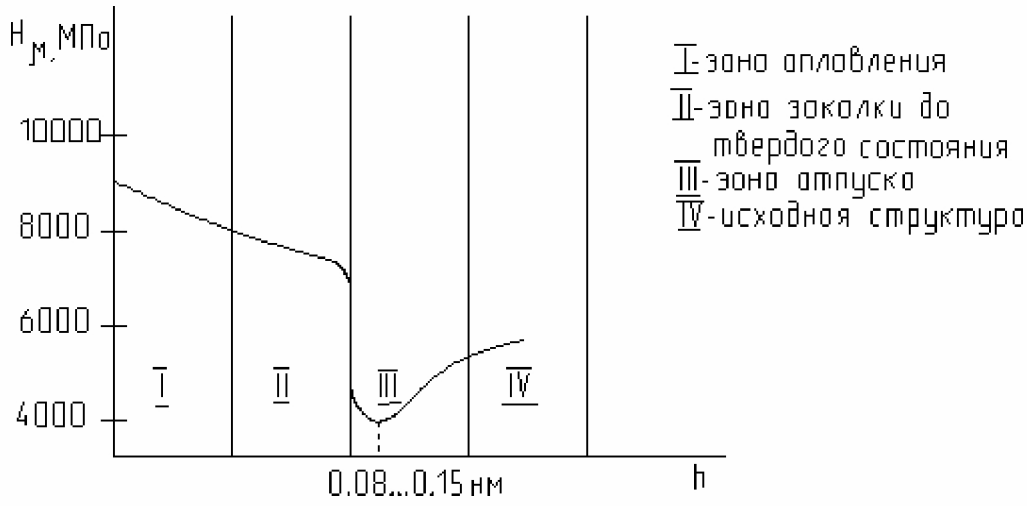


Рисунок 8.10 – изменение микротвердости поверхностного слоя при лазерной обработке поверхности

На сталях достигаются значения микротвёрдости H_μ до 8000…10000 МПа.

На титановых сплавах (ВТ4, ВТ3-1) H_μ=8000…13000 МПа.

Лазерное легирование. В этом случае расплавленным лазерным пучком в тонкий поверхностный слой вводятся легированные элементы, которые после перемешивания с основой металла образуют новый сплав, твёрдость поверхности ещё больше возрастает.

Легированные элементы: W, B, Mo, TiC, TiN.

Сталь – B - H_{μ}=6000 МПа;

Сталь – TiN - H_{μ}=16000…20000 МПа

9. ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ГТД

9.1 Назначение, особенности, виды и материалы покрытий. Предъявляемые к ним требования

Около 75 % деталей авиационных двигателей имеет металлические или керамические покрытия для защиты от коррозии, износа и высокотемпературного окисления, а также для специальных целей, например уплотнения.

Выбор материала и способа нанесения покрытия производится с учетом следующих основных положений.

1. Условия эксплуатации покрываемой детали или узла (температура, условия контакта, среда и др.).

2. Химическая и металлургическая совместимость материалов покрытия и подложки, которая предполагает образование прочных связей между ними и отсутствие электрохимического взаимодействия. При этом следует учитывать возможность уменьшения прочности сцепления покрытия с подложкой в процессе эксплуатации в связи с возможным выделением на их границе фаз, образованием хрупких соединений, коррозионными процессами и проч.

3. Возможность нанесения покрытия на данный материал выбранным способом.

4. Физико-механическая совместимость. Подразумевает близость физических и механических свойств материалов покрытия и подложки, в частности модулей упругости, твердости, коэффициента термического расширения.

5. Возможность получения структуры покрытия с заданным комплексом свойств.

6. Возможность нанесения покрытия на деталь данной формы с обеспечением равномерности толщины и свойств.

9.2 Уплотнительные покрытия

Уменьшая величину зазоров между лопатками и кожухом можно повысить эффективность двигателя на 5 %. Этого можно добиться, например, нанесением на внутреннюю поверхность деталей статора срабатываемых (уплотнительных) покрытий, которые, изнашиваясь при взаимодействии с лопатками вращающегося ротора, формируют минимальный зазор (рис. 9.1). Места нанесения уплотнительных покрытий показаны на рис. 9.2.

Срабатываемые покрытия должны иметь малое сопротивление изнашиванию при сравнительно высокой прочности и жаростойкости. Эффективная величина зазора должна сохраняться в течение ресурса работы двигателя. Этот комплекс свойств обеспечивается специфическим строением многокомпонентных материалов, свойствами используемых связок, пористостью, технологией нанесения покрытий. Фирма Sermatech Manufacturing Group (SMG) рекомендует к использованию в качестве срабатываемых материалов полимеры, кремнеорганические полимеры с алюминиевым наполнителем, композиции Me- полимер-нитрид бора, металлографитовые композиции (Ni-25 % C), покрытия Me-Cr; Al; Y, окись циркония, стабилизированную итрием. Тот или иной материал назначается в зависимости от действующих температур (рис. 9.3). При температурах, превышающих 800 °C, рекомендуются керамические термобарьерные покрытия ($Zr0_2$-Y_20_3). Следует отметить, что применение самосрабатывающих покрытий одновременно может решить проблему защиты от воздействия высоких температур, достигающих 1200°C.

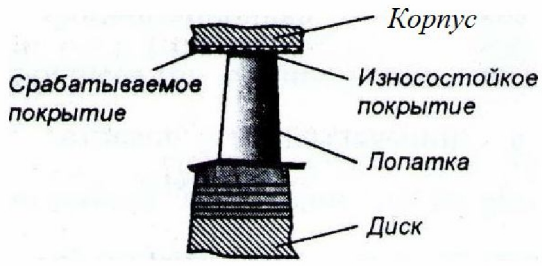


Рис. 9.1. Использование срабатываемого покрытия для минимизации зазора между торцом лопатки и элементами статора двигателя

Места нанесения уплотнительных покрытий

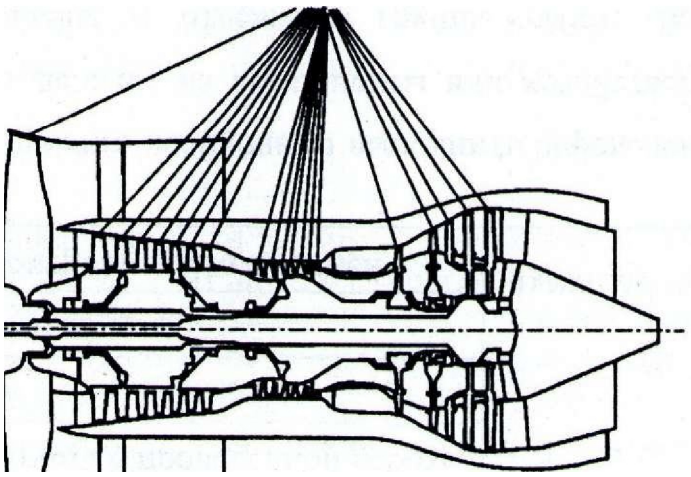


Рис. 9.2 - Места нанесения уплотнительных покрытий

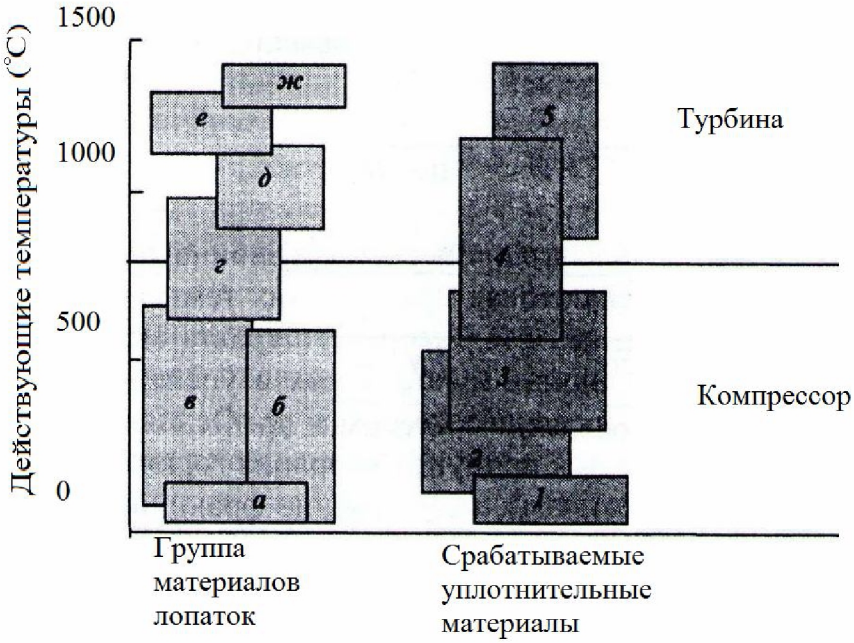


Рис. 9.3 - Материалы, применяемые для изготовления лопаток и нанесения уплотнительных покрытий:

а - композиционные полимерные материалы; *б* - титановые сплавы; *в* - стали; г - сплавы на никелевой и кобальтовой основах; *д* - сплавы с направленной кристаллизацией; *е* - сплавы с монокристаллической структурой; ***ж*** - оксидно-дисперсно-упрочненные сплавы; 1 - полимеры; 2 - полимеры с наполнителем из алюминиево-кремниевых сплавов или A1-BN; *3* - композиция металл-твердая смазка (Ni-25 % C); *4* - пористые композиции Me, Cr, Al, Y; *5* - керамические материалы (Z1O2-Y2O3)

ММПП «Салют» в качестве срабатываемых покрытий, работающих до температур порядка 550 °С, используется материал АНБ, исходные гранулы которого содержат 18 ... 23 % BN, 4 ... 8 % SiC***>2,*** остальное - алюминий. При более высоких температурах применяется уплотнительное покрытие УВС-2.

Срабатываемые покрытия наносятся методами газопламенного, сверхзвукового газопламенного (СГН) или плазменного напыления. В двух последних случаях в композиции материалов вносятся специальные добавки, обеспечивающие необходимую пористость покрытий.

Нанесение уплотнительного покрытия АНБ производится методом плазменного порошкового напыления в специальной камере, внутри которой установлены устройство для закрепления и вращения деталей и механизм перемещения плазмотрона. Для увеличения прочности сцепления покрытия с основой на подложке делается нарезка типа рваной резьбы, реализующая замковый (анкерный) эффект, и газопламенным способом наносится подслой толщиной 0,1 ... 0,2 мм самофлюсующегося материала ВКНА (ПН75Ю23В).

Покрытие УВС-2 наносят газопламенным способом. Исходный материал выпускается в виде стержней.

9.3 Жаростойкие покрытия

Газовой коррозией называют процесс коррозионного разрушения металлов и сплавов в газовых потоках при высоких температурах. Газовой коррозии подвержены многие детали горячего тракта авиационных двигателей: камеры сгорания, лопатки последних ступеней компрессора и газовой турбины, сопла, форсажной камеры и др. Основными компонентами газового потока являются продукты сгорания горючего. Это оксиды азота и углерода (NO*, $C0_2$), H_20, несгоревшие фракции горючего C_XH_Y. Избыточная подача воздуха обеспечивает окислительную среду продуктов сгорания. В потоке газа присутствуют также продукты окисления топливных примесей, частицы и соединения, поступающие с воздухом (соединения серы, соли натрия, калия и кальция, пары морской воды и т.д.). Состав и концентрация

соединений газового потока зависят от условий эксплуатации и уровня рабочих температур в камере сгорания.

Основной причиной разрушения деталей горячего тракта двигателя является высокотемпературное окисление, которое может усугубляться параллельным протеканием других химических реакций (с серой, солями щелочных металлов, легкоплавкими оксидами и проч.). Свойство материалов сопротивляться высокотемпературному окислению называют жаростойкостью. Высокотемпературное воздействие кислорода на поверхности деталей может приводить к разрушению материала вследствие образования и отслаивания окисных пленок, к внутреннему окислению, возникающему в результате диффузии кислорода по границам зерен, а также к образованию твердых растворов и соединений кислорода с компонентами сплавов. В итоге снижается прочность и уровень механических свойств материала, в частности пластичность. Окисление, диффузионные процессы и механические нагрузки приводят к образованию в поверхностном слое микротрещин, пор, зон с различной твердостью и прочностью и других концентраторов напряжений.

Очевидно, что сопротивление высокотемпературному окислению определяется химической активностью металла или сплава по отношению к кислороду и свойствами образующихся окисных пленок.

Следующие факторы обусловливают защитную способность окисных пленок:

сплошность. Сплошные пленки возникают в тех случаях, когда объем образовавшегося окисла больше объема окисленного металла: $V_{Me0} / V_{Me} > 1$;

пористость. На многих металлах (Fe, Ti, Zr, Nb, Ta, Hf, W, Mo и др.) образуются пористые проницаемые окисные пленки, не обеспечивающие необходимую защиту от высокотемпературного окисления;

различие в коэффициентах термического расширения окисла и основного металла, вследствие чего при колебаниях температуры,

характерных для условий работы ГТД, происходит растрескивание и отслоение окис- ных пленок;

различие в значениях модуля упругости окисла и основного металла; толщина окисной пленки. Толстые окисные пленки, образующиеся в условиях высокотемпературного окисления, являются более пористыми, чем тонкие, и имеют повышенную концентрацию дефектов;

физико-химические свойства. Некоторые окислы при высоких и повышенных температурах становятся летучими ($СЮ_3$, $Mo0_3$), расплавляются (V_20_5) или подвергаются дальнейшему окислению (Cr_20_3 -> CO_3).

Из всего многообразия оксидов металлов наиболее стойкими являются $A1_20_3$, Cr_20_3, $Si0_2$. По этой причине A1, Cr и Si служат базовыми элементами, используемыми в жаростойких покрытиях.

Актуальной является проблема защиты от высокотемпературной коррозии никелевых сплавов, из которых в основном изготавливаются детали горячего тракта ГТД.

В настоящее время для этих целей широко используются покрытия систем Me (Ni, Co) - Cr - A1 - Y, A1 - Si - Ni - Y.

При выборе состава покрытия и содержания базовых элементов руководствуются следующими факторами:

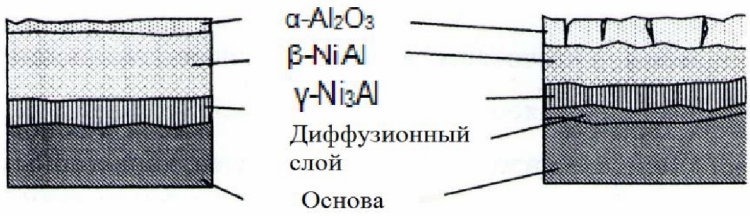
минимальным различием коэффициентов термического расширения покрытия и защищаемого сплава;

уровнем рабочих температур и составом окислительной среды, определяющих условия формирования защитных пленок, интенсивность диффузионных процессов и скорость деградации защитных свойств покрытия; степенью влияния покрытия на усталостную прочность деталей; способом нанесения покрытия и возможностями дальнейшей обработки с целью повышения прочности сцепления, плотности, шероховатости и т.д.

Основой большинства покрытий, применяемых для защиты лопаток газовых турбин, является жаростойкая фаза (β-NiAl. Для повышения ее

стабильности в состав покрытия дополнительно вводятся легирующие элементы (Ta, Hf, Y, Si и др.). Введение итрия позволяет устранить порообразование в покрытии в процессе эксплуатации и увеличивает адгезию верхней окисной пленки. Некоторые добавки увеличивают пластичность покрытия, что является важным условием его работоспособности.

Деградация покрытия (рис. 9.4) происходит в результате развития диффузионных процессов, приводящих к окислению (β-NiAl с ростом окисной пленки и постепенному выгоранию из материала покрытия жаростойких компонентов, что ухудшает условия залечивания разрушений защитного слоя. Следует отметить, что указанное обеднение материала может быть вызвано диффузионным рассасыванием жаростойких компонентов в подложку. В качестве диффузионных барьеров, препятствующих такому рассасыванию, используются слои из тугоплавких металлов (W, Ta, Nb), обладающих малой диффузионной подвижностью, и благородные металлы (Pt, Pd, Ir).



***а* - исходное покрытие;** ***б* - покрытие после наработки**

Рис. 9.4. Развитие повреждения жаростойкого покрытия:

Жаростойкие покрытия можно получать следующими способами: диффузионным насыщением (порошковым и шликерным алитирова- нием и алюмосилицированием, хромоалитированием, хромированием и силицированием);

способами PVD (дуговое, магнетронное и электронно-лучевое испарение с последующей конденсацией);

плазменным и сверхзвуковым газопламенным напылением и др. Некоторые покрытия одновременно выполняют функции жаростойких и уплотнительных.

Для защиты литых лопаток турбины из сплава ЖС6У с равноосной структурой широко используется покрытие СДП-2 (Ni - 20 % Cr - 12 % Al - 0,5% Y), наносимое дуговым вакуумным испарением на установках МАП-1. Для лопаток из сплавов ЖС26ВИ и ЖС32ВИ с монокристальной структурой используют алюминидное покрытие ВСДП-11 (AL - Si - Ni - Y), обладающее высокими защитными свойствами при температурах 1050 ... 1100 °С. Покрытие с кремнием формируется в процессе диффузионного отжига нанесенного на установке МАП-1 слоя и состоит из внешней зоны (β-NiAl) и диффузионной зоны (β-NiAl, γ-Ni_3Al, карбиды) на границе с подложкой.

Технологический процесс нанесения покрытий на установках МАП-1 включает следующие основные операции:

подготовка поверхностей пера лопаток к нанесению покрытия (обезжиривание, промывка, гидроабразивная обработка, промывка в ультразвуковой ванне, обезжиривание и сушка);

загрузка деталей (сборка лопаток в кассеты, установка кассет в рабочую камеру);

нанесение покрытия (создание вакуума, ионная очистка пера лопаток в плазме материала покрытия, нанесение покрытия заданной толщины, охлаждение лопаток в вакууме, выгрузка покрытых деталей);

контроль качества покрытий;

вакуумный отжиг лопаток с покрытием при температуре 1010 °С в течение 4 ч;

окончательный контроль качества покрытия методами люминесцентной и цветной дефектоскопии.

Предварительная подготовка поверхности пера лопаток проводится с целью удаления загрязнений, обеспечения равномерности поверхностного слоя и частичной его активизации.

Ионная бомбардировка поверхности выполняется непосредственно перед нанесением покрытия с целью удаления окисных пленок и тонких слоев металла, нагрева и активизации поверхности. Она является необходимым условием обеспечения высокой прочности сцепления покрытия с подложкой.

Скорость нанесения покрытия составляет 25 ... 70 мкм/ч. Качество покрытия обеспечивается автоматическим поддержанием технологических режимов.

Контроль толщины покрытия осуществляется по изменению массы лопаток взвешиванием и по шлифам на образцах-свидетелях. Последние служат также для определения прочности сцепления покрытия с подложкой путем изгиба на оправках радиусом 4 ... 5 мм.

9.4 Термобарьерные покрытия

Никелевые сплавы, из которых изготавливают детали газовых турбин, имеют температуру плавления 1200 ... 1315 °С, в то время как температура газового потока составляет ~1350 °С и выше. Для обеспечения работоспособности деталей в таких условиях часть воздуха, поступающего от компрессора, идет на охлаждение, что снижает эффективность двигателя и увеличивает расход топлива. Для того чтобы снизить эти потери, на детали и узлы ГТД наносят термобарьерные покрытия (ТБП).

ТБП используются уже более 25 лет, в настоящее время они есть практически на всех двигателях гражданской авиации и большей части военной. Это позволяет улучшить качественные характеристики двигателей, уменьшить расход воздуха на охлаждение, сэкономить топливо, на 100 ... 150 °С увеличить температуру газового потока. Одновременно повышается ресурс и надежность деталей, работающих при высоких температурах, снижается выброс вредных веществ, что обусловлено более полным сгоранием горючего. ТБП одновременно защищают материал от окисления и воздействия высоких температур.

Наиболее часто в качестве материала термобарьерных покрытий используется окись циркония. Это вызвано в первую очередь ее низкой теплопроводностью (~1 ... 1,8 Вт/мК), а также тем, что она имеет близкий к никелевым сплавам коэффициент термического расширения.

Для первых ТБП, наносимых на внутреннюю поверхность камеры сгорания, использовались покрытия, в которых прочная кубическая кристаллическая структура окиси циркония стабилизировалась добавками 22 % MgO. Эти покрытия работали при температурах ~980 °С. При более высоких температурах происходила дестабилизация структуры $Zr0_2$ и как следствие разрушение покрытия.

Вторым поколением ТБП стали разработанные в конце восьмидесятых покрытия из $Zr0_2$, частично стабилизированные 7 % Y_20_3. Они широко используются и в настоящее время. Рабочие температуры таких покрытий составляют ~1090 °С. ТБП обычно состоят из двух слоев, выполняющих различные функции. Верхний керамический слой воспринимает тепловое и эрозионное воздействие газового потока и, обладая низкой теплопроводностью, снижает температуру защищаемой детали (лопатки, рубашки камеры сгорания и др.). Под керамическим слоем находится жаростойкий слой (алюмо- платиновый, NiCoCrAlY и др.), защищающий базовый металл от окисления и способствующий повышению прочности сцепления керамического слоя с подложкой. Слой окиси циркония имеет толщину ~250 мкм, а слой жаростойкого покрытия NiCoCrAl - толщину ~80 ... 120 мкм. В процессе эксплуатации разрушение ТБП происходит вследствие эрозии, вызванной воздействием газового потока, ослабления прочности сцепления керамического слоя покрытия с подложкой. Последнее связано с тем, что в результате диффузионных процессов на границе керамического и жаростойкого слоев образуются и растут зерна $A1_20_3$. Замедление развития таких образований является одной из важных проблем, разрешить которую можно, в частности, добавляя иттрий.

Снизить теплопроводность покрытий на основе $Zr0_2$ удается также их многослойным нанесением. Каждый такой слой имеет столбчатую структуру. В настоящее время разрабатываются ТБП нового поколения, в том числе на основе фосфата лантана и гексоалюмината лантана. Эти материалы могут эксплуатироваться при температурах 1100...1600℃

Для нанесения ТБП используются три основных способа: физическое осаждение испаренного электронным лучом в вакууме материала (EB-PVD), химическое осаждение паров материала (CVD) и газотермическое напыление. Каждая из этих технологий имеет свои достоинства и недостатки. Преимуществом плазменного напыления является возможность нанесения покрытия на труднодоступных поверхностях (например, внутри камеры сгорания), простота регулирования состава покрытия, низкая стоимость и высокая производительность. Для увеличения прочности сцепления покрытия с основой и повышения жаростойкости ТБП может наноситься в несколько слоев, как это показано на рис. 9.5.

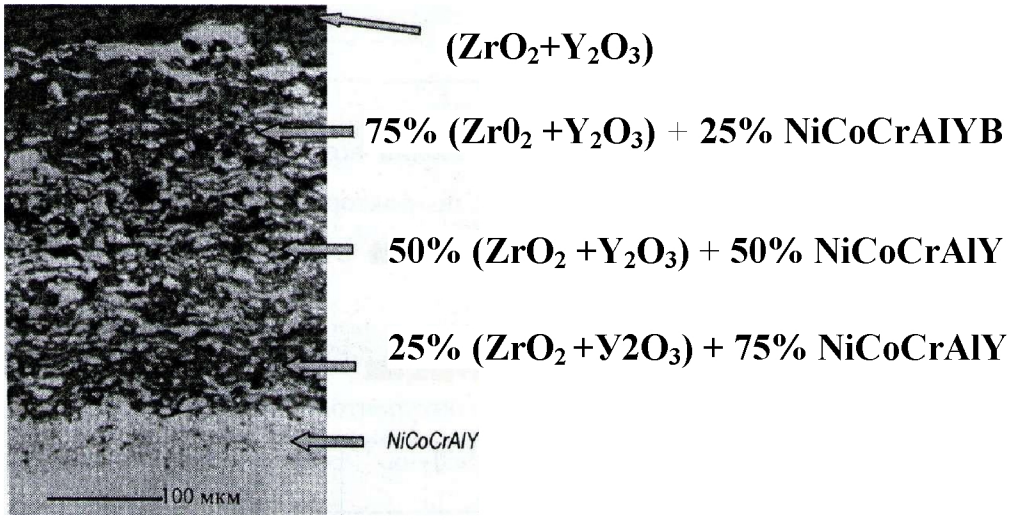


Рис 9.5. Многослойная структура ТБП, полученного плазменным напылением

ТБП первого поколения наносились плазменным напылением, а для покрытий второго поколения для наиболее ответственных деталей используют испарение керамики электронным лучом. Такие покрытия обладают повышенным сопротивлением термической усталости, имеют

низкую шероховатость и высокую эрозионную стойкость. Процесс EB-PVD позволяет избежать заращивания охлаждающих отверстий в процессе нанесения покрытия. Структуры ТБП показаны на рис. 9.6.

В процессе нанесения покрытия поверхность стержня из циркониевой керамики нагревается электронным пучком в камере с высоким вакуумом. При температуре 3000 °С материал стержня испаряется и образующиеся пары, конденсируясь на поверхностях деталей, формируют покрытие. Равномерность нанесения покрытия обеспечивается перемещением детали в облаке испаренного материала.

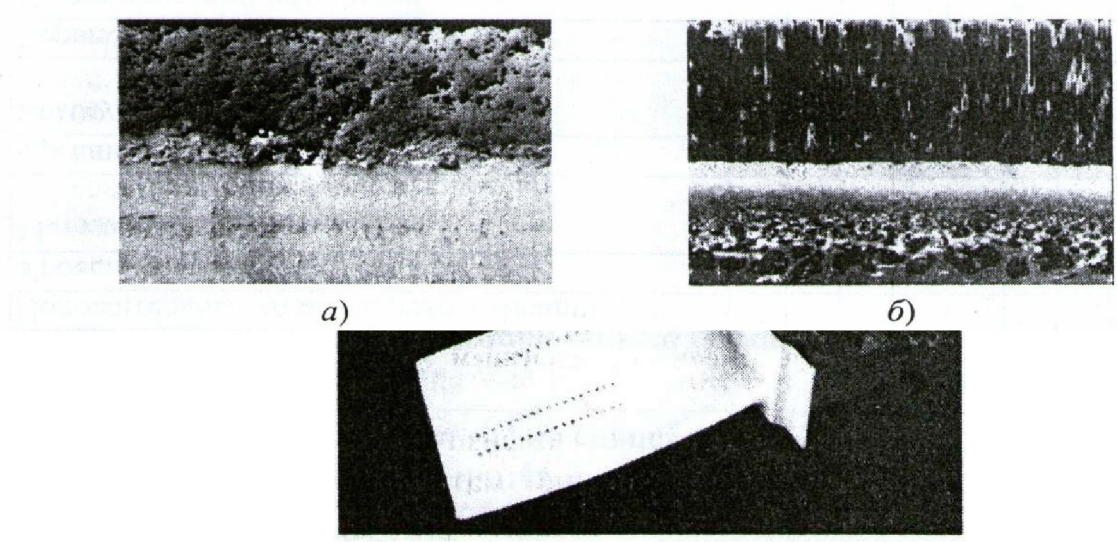


Рис. 9.6. Лопатка турбины с термобарьерным покрытием

Покрытие формируется в результате осаждения отдельных атомов и молекул с образованием микроскопических столбчатых структур (столбики кристаллитов, направленных перпендикулярно поверхности). ТБП с открытой столбчатой структурой, которая считается наилучшей для термобарьерных покрытий, имеют высокие механические свойства, могут длительное время сопротивляться термическим ударам, например возникающим при работе в газовых турбинах при каждом старте и остановке, и выдерживать «забросы» температуры. Метод EB- PVD обеспечивает наибольшую прочность сцепления керамического покрытия, что обусловлено химическим взаимодействием паров керамики с металлом поверхности. ТБП,

нанесенное на лопатку газовой турбины способом EB-PVD, показано на рис. 9.6.

9.5 Современные способы и технологии нанесения покрытий

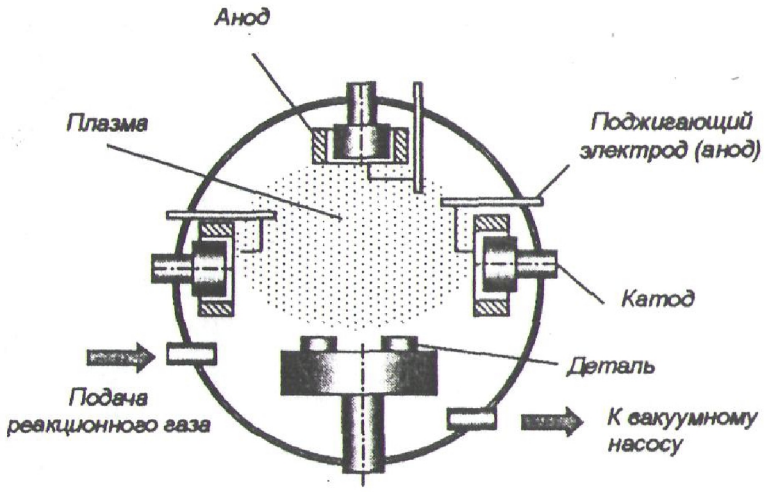


Рисунок 9.7 - Схема нанесения покрытий способом дугового испарения

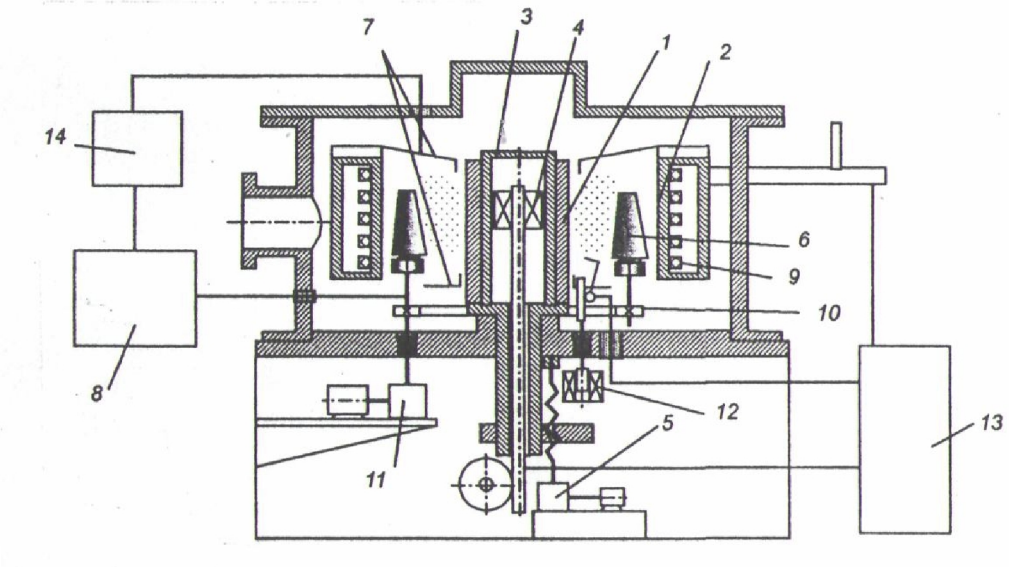


Рисунок 9.8 – Схема промышленной установки МАП-1 для ионно-плазменного осаждения защитных покрытий на рабочие лопатки турбины:

1-катод; 2-анод; 3-водоохлаждаемая оправка; 4 – электромагнитный фиксатор катодных пятен вакуумной дуги; 5-привод перемещения катода; 6 – покрываемые лопатки; 7 – экраны; 8 – регулируемый источник постоянного тока; 9 – электромагнитная анодная катушка; 10 – планетарный механизм вращения покрыаемых лопаток; 11- электропривод механизма вращения лопаток; 12 – механизм зажигания дуги; 13 – выпрямитель; 14 - коммутатор

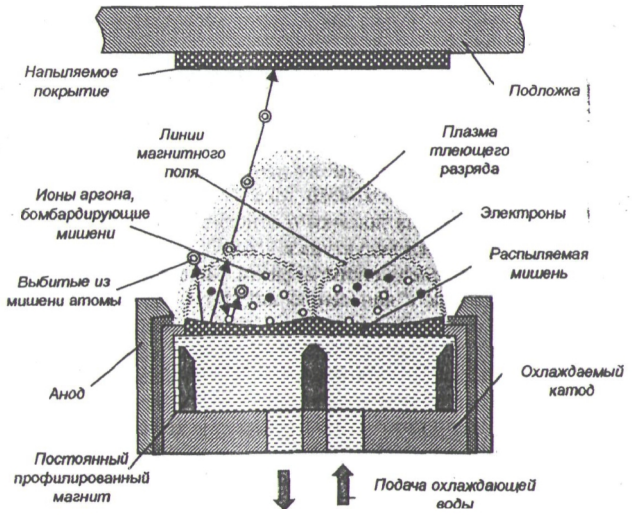


Рисунок 9.9 - Схема магнетронного распыления

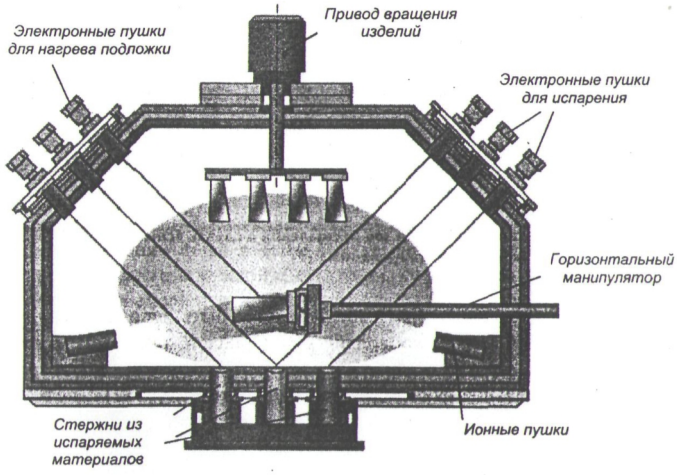


Рисунок 9.10 - Схема установки вакуумного напыления с испарением наносимого материала электронным лучом

Одним из современных и наиболее перспективных способов нанесения покрытий является конденсация испаренного материала в вакууме. По международной классификации эти процессы называют PVD (Physical Vapour Deposition). Эта технология позволяет наносить многокомпонентные покрытия из различных материалов - металлов, сплавов, металлокерамик (карбидов, нитридов, боридов, силицидов металлов, алмазоподобных структур), предназначенных для защиты рабочих поверхностей деталей ГТД от износа и эрозии, воздействия внешней среды, для повышения жаростойкости и т.д.

Технология основана на следующих физических и химических процессах:

испарение материала покрытия в условиях глубокого вакуума;

ионизация образующихся паров электрическим разрядом;

перемещение образовавшихся ионов в электростатическом или электромагнитном поле к деталям, на которые наносится покрытие;

бомбардировка ионами поверхностей деталей, в процессе которой происходит очистка последних;

плазмохимические реакции образования ионов химических соединений (нитридов, карбидов или оксидов металлов), для чего в рабочую камеру подается реактивный газ (азот, метан или кислород);

осаждение (конденсация) ионов на поверхности с формированием покрытия требуемого состава.

Для нанесения покрытий конденсацией испаренного материала в вакууме используются три основные группы методов, отличающиеся способом испарения наносимого материала:

дуговое испарение;

магнетронное распыление;

испарение электронным лучом.

Способ дугового испарения нашел наиболее широкое применение. Он используется на специальных установках (ВПТ-А, ВПТ-12, «Пуск», «Булат», МАП-1 и др.). На рис. 9.7 приведена схема установки типа «Булат». Принцип ее работы следующий: в камеру на стол устанавливают детали, подлежащие напылению. Камера закрывается (герметизируется), и в ней создается вакуум с давлением порядка 10^{-3} Па. Между анодом, поджигающим электродом и катодом, выполненным из наносимого материала, подается напряжение.

Поджигающий электрод служит для зажигания электрической дуги. Это действие производится кратковременным касанием поджигающего электрода поверхности катода. Возникшая между анодом и катодом дуга устойчиво горит в парах материала катода при напряжении 20 ... 30 В и силе тока 150 ...

300 А. Испарение материала производится из области катодных микропятен вакуумной дуги. Для ионизации и ускорения ионов плазмы на детали подается отрицательный потенциал. В случае высокого отрицательного потенциала (1 ... 1,5 кВ) происходит эффективная ионная очистка поверхностей. После очистки значение потенциала снижается до 100 В, и в этих условиях производится процесс нанесения (конденсации) покрытия.

Работает один или несколько катодов, которые могут быть изготовлены из различных материалов. Если требуется получить покрытие из карбидов, нитридов или оксидов металлов, в камеру подается реактивный газ. Получаемые докрытая имеют высокую прочность сцепления с подложкой, дисперсною структуру и малую пористость.

Этот метод широко используется для упрочнения режущего и штампового инструмента (покрытия TiN, TiC, ZrN и др.), нанесения алмазных износостойких и антифрикционных покрытий. Для нанесения на рабочие лопатки турбин ПГД жаростойких многокомпонентных покрытий системы Ni - Cr - A1 - Y и др. применяется установка МАП-1 (рис. 9.8).

Установка представляет собой цилиндрическую вакуумную камеру объемом около 0,7 $м^3$ с системой откачки. В камере размещается трубчатый катод *1,* выполненный из материала покрытия. На одной оси с катодом расположен анод 2, изготовленный из нержавеющей стали. В полости охлаждения анода находится электромагнитная катушка *9.* Вращение 24 лопаток *6* осуществляется планетарным механизмом *10.* На нижнем основании вакуумной камеры расположен механизм зажигания дугового разряда *12,* состоящий из поджигающего электрода и тягового электромагнита. Катод *1* размещен на водоохлаждаемой оправке *3.* В полости оправки находится трехсекционный электромагнитный фиксатор катодных пятен вакуумной дуги *4,* перемещающийся вдоль оси. Оправка *3* от привода *5* совершает возвратно-поступательное движение, что обеспечивает равномерную эрозию катода *1.* Питание вакуумной дуги осуществляется трехфазным регулируемым выпрямителем *13.* Установка имеет

регулируемый источник постоянного тока *8*, подающий отрицательный электрический потенциал на лопатки *6* относительно экрана 7, и источник питания электромагнитных катушек.

Установка работает следующим образом. Лопатки турбины, предварительно подготовленные к нанесению защитного покрытия, устанавливаются в кассеты, которые помещаются в гнезда планетарного механизма. Камера вакуумируется до остаточного давления не выше 10^{-3} Па. После включения привода 11 лопаткам сообщается планетарное вращение относительно собственной оси и одновременно вокруг катода *1*, который от привода 5 совершает возвратно-поступательное движение со скоростью 0,01 мм/с. С помощью замыкания и размыкания контакта поджигающего электрода с катодом в условиях кратковременного пропускания тока между катодом *1* и анодом 2 инициируется вакуумный дуговой разряд. Горение разряда при токах вакуумной дуги 1000 ... 1200 А и напряжении 40 ... 45 В обеспечивается выпрямителем *13*. Катод эродирует под действием катодных пятен вакуумной дуги, плотность теплового потока в которых достигает 10^9 ... 10^{10} Вт/м^2. Пятна являются источником потоков ионизированной металлической плазмы, в которых присутствуют пары и капли материала покрытия. Покрытие формируется в процессе конденсации продуктов эрозии катода на поверхности пера лопатки.

Магнетронное распыление производится путем создания высокого напряжения в разряженной газовой среде (обычно в аргоне) для образования плазмы тлеющего разряда.

При распылении ионы плазмы бомбардируют мишень из материала наносимого покрытия и выбивают атомы, сообщая им энергию, достаточную для перемещения к покрываемой детали и осаждения на ней. Производительность распыления резко увеличилась за счет использования планарных магнетронов, разработанных в 60-х годах прошлого столетия. В этой технологии магниты локализуют плазму тлеющего разряда на отдельных участках мишени. При этом увеличивается плотность ионов,

бомбардирующих поверхность. Схема магнетронного распыляющего устройства приведена на рис. 9.9.

Процесс магнетронного распыления может быть использован для нанесения покрытий как из проводящих материалов, так и диэлектриков (пластиков, керамик и др.). Профилированием постоянных магнитов добиваются оптимальной формы магнитного поля с целью эффективного регулирования процесса распыления, что достаточно сложно осуществить другими методами. В настоящее время в магнетронных системах используют профилированные постоянные магниты, в частности из Nb-Fe-B, которые на 30 % мощнее традиционных.

Для обеспечения высокой адгезии предусматривается предварительная очистка поверхности изделий источником ионов газов. Для нанесения покрытий магнетронным распылением используются установки «Мир», ВПТ-50 и др.

Испарение электронным лучом (EB-PVD) имеет ряд существенных преимуществ, например возможность нанесения покрытий из непроводящих и тугоплавких материалов (керамики, W, Re, Ta и т.д.). Способ разработан в Институте электросварки им. Е.О. Патона (установки УЭ175 и УЭ137). Схема установки для нанесения покрытий электронно-лучевым испарением приведена на рис. 9.10. Для увеличения прочности сцепления покрытий поверхности деталей, устанавливаемых на горизонтальном манипуляторе или подвешиваемых на вращающемся диске, очищают ионной бомбардировкой. Нагрев деталей производится электронным лучом, ионной бомбардировкой или радиационным способом. Процесс нанесения покрытия проводится в вакууме при давлении не ниже $8{,}75 \cdot 10^{-3}$ Па. В настоящее время этот способ является наиболее эффективным способом нанесения керамических термобарьерных покрытий на лопатки газовых турбин.

Установка имеет шесть электронных пушек, размещенных в вакуумной камере. Четыре пушки используются для испарения материала, а две - для предварительного нагрева детали, что способствует увеличению прочности

сцепления покрытия с подложкой. Электронные лучи высокой энергии - 45 кВт каждый - фокусируются на стержнях испаряемых материалов. Для обеспечения равномерности покрытия детали перемещаются в облаке испаренного материала. Стержни могут быть из различных материалов. В этом случае после испарения происходит перемешивание паров и состав покрытия определяется долями испаренных материалов. Возможно также многослойное нанесение покрытий.

Термохимическое осаждение покрытий - по международной классификации CVD (Chemical Vapour Deposition) - является методом формирования материалов, деталей или покрытий с плотной структурой из газообразных соединений материалов со сравнительно высоким давлением паров. Газообразное соединение, содержащее наносимый материал, подается к поверхности детали или форме, где происходит термическая реакция, приводящая к образованию твердых соединений, осаждающихся на поверхность. Газообразные продукты этой реакции отводятся.

Метод CVD имеет множество разнообразных применений, таких, как: нанесение покрытий, получение порошковых и нанопорошковых материалов, керамических волокон, монолитных деталей. С помощью методов CVD можно получать покрытия практически из любых подходящих для этих целей металлов и неметаллов, включая углерод и кремний, а также соединений (карбидов, нитридов, боридов, оксидов, интерметаллидов и др.).

Основным преимуществом метода CVD является использование газовых сред, что позволяет наносить покрытия в труднодоступных местах, таких, как отверстия малого диаметра, внутренние полости труб, сосудов и проч. Материал покрытия заполняет мельчайшие поры в поверхности. Кроме того, CVD обеспечивает:

получение покрытий или веществ высокой химической чистоты, обычно 99,99 - 99,999 %;

высокую плотность покрытия (около 100 % от теоретической); высокую равномерность покрытия;

сравнительно высокую производительность и возможность одновременной обработки многих деталей.

Установки, применяемые для CVD, в зависимости от назначения могут иметь различные конструктивные особенности, однако все они снабжены источником реакционных газов, рабочей камерой (реактором), устройством нагрева, подложки и системой откачки или регенерации газов. Реакторы могут быть различной формы и размеров, а процессы CVD протекать в широком диапазоне давлений (от высокого вакуума до нескольких атмосфер) и температур. Реакционные газы могут подаваться из баллона со сжатым газом или генерироваться в специальном реакторе. Методом CVD получают керамические и. металлокерамические покрытия, имеющие исключительно мелкозернистую структуру. Такие покрытия могут использоваться для самых разных целей, в том числе для защиты от эрозии лопаток компрессора, упрочнения режущего и штампового инструмента. Основными материалами покрытий являются: TaN, HfN, TiC, HfB_2, ZrB_2, BN, ZrN, TiN, TiB_2, SiC, B_4C и Si_3N_4.

9.6 Термохимическое осаждение покрытий

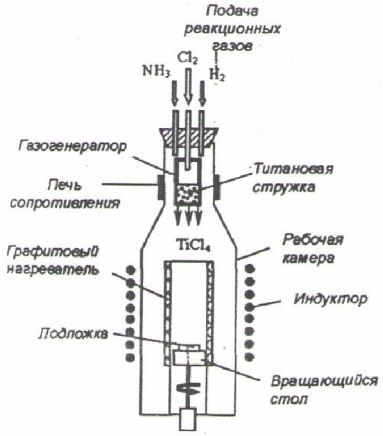


Рисунок 9.11 – Принципиальная схема реактора для формирования покрытия TiN

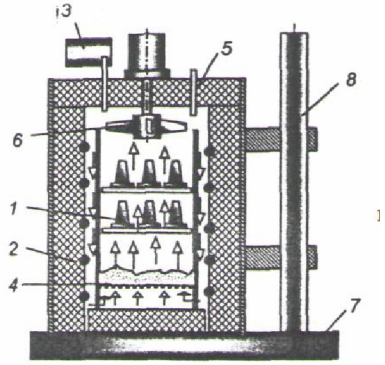


Рисунок 9.12 – Схема установки для нанесения покрытий методом транспортных реакций:

1 – детали; 2 – муфельная печь; 3 – испаритель галогенидов; 4 – источник переносимого элемента; 5 – выпуск отработанного газа; 6 – вентилятор; 7 – основание; 8 - стойка

9.7 Газотермическое напыление

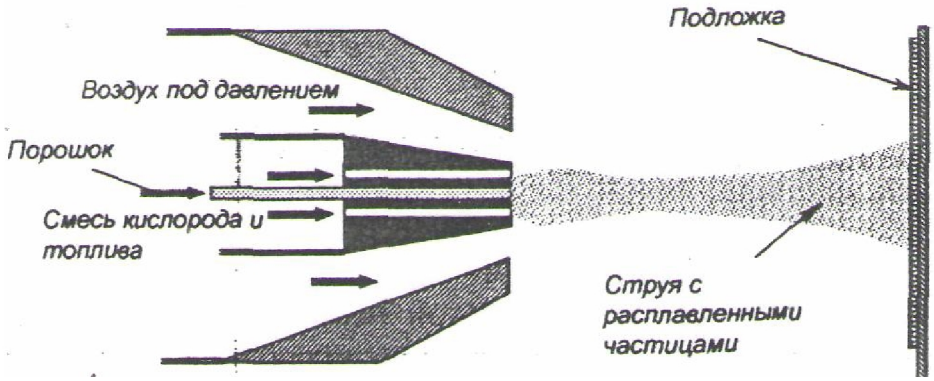


Рисунок 9.13 – Схема газопламенного напыления

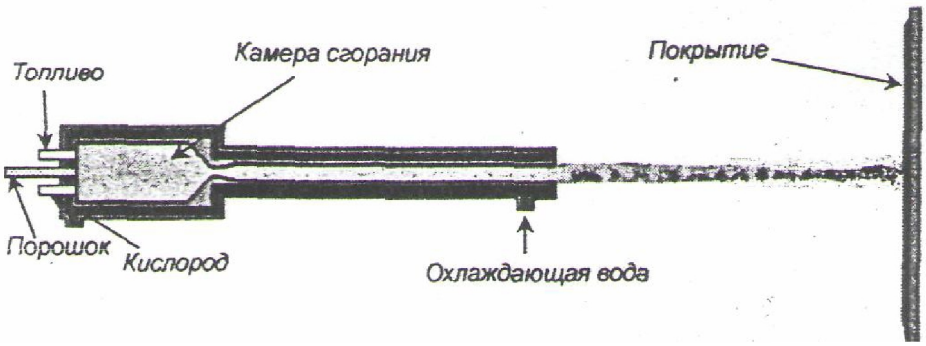


Рисунок 9.14 – Схема процесса СГН

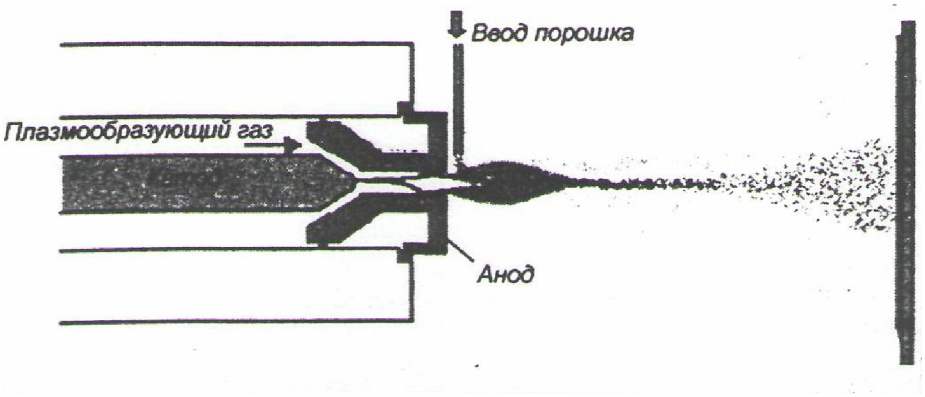


Рисунок 9.15 – Схема плазменного напыления

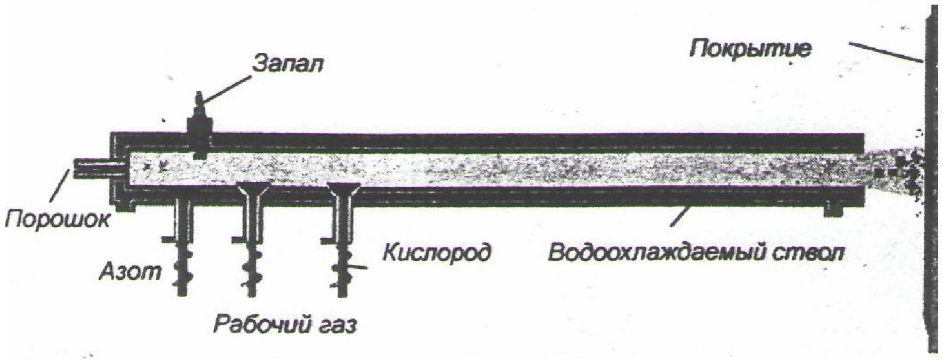


Рисунок 9.16 – Схема детонационного нанесения покрытий

Этими методами получают покрытия на основе металлических, керамических и металлокерамических материалов толщиной от десятков микрометров до нескольких миллиметров в процессе бомбардировки подложки ускоренными расплавленными или полурасплавленными частицами, переносимыми струей газа. Схема формирования таких покрытий приведена на рис. 9.17. В качестве исходных материалов для газотермического напыления используются проволоки или порошки. Наносимый материал может содержать один элемент, но чаще это сплавы или композиции с необходимым комплексом свойств, обеспечивающих работоспособность детали или узла в заданных условиях эксплуатации и прочность сцепления с основным материалом. Таким образом можно получать металлические, керамические, пластиковые и композиционные многослойные и многокомпонентные покрытия.

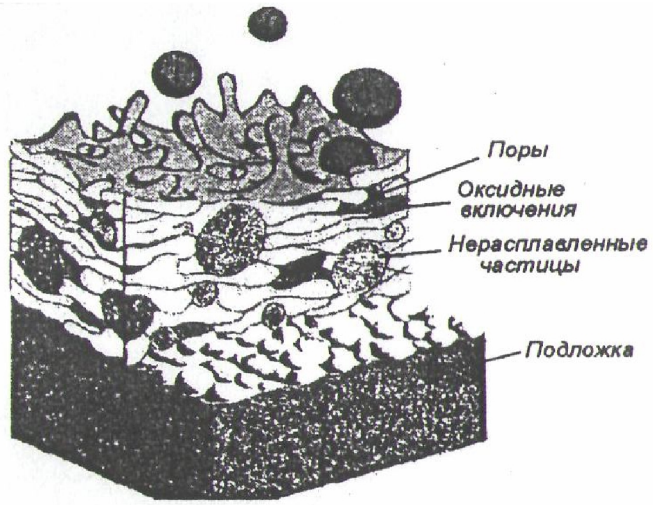


Рисунок 9.17 – Схема формирования покрытий методом газотермического напыления

Объекты напыления - рабочие и направляющие лопатки газовых турбин, камеры сгорания, патрубки, форсунки и фронтальные устройства камер сгорания, вкладыши подшипников скольжения, лабиринтные уплотнения, статорные части компрессора и турбины (срабатываемые уплотнительные материалы), контактные площадки опор и другие детали.

Достоинством термического напыления является сравнительно низкая стоимость при высоких производительности и качестве наносимых покрытий.

На практике используется множество способов газотермического напыления. Основными являются:

газопламенное напыление,

сверхзвуковое (высокоскоростное) газопламенное напыление (СГН),

электродуговое напыление,

плазменное напыление,

плазменное напыление в камерах с контролируемой атмосферой,

детонационное напыление.

Газопламенное напыление позволяет наносить покрытия из различных материалов на детали различной формы. Исходным материалом покрытия служит порошок или проволока, постоянно подаваемая в пламя горелки;

после расплавления разогретым газовым потоком она переносится на покрываемую поверхность.

Портативность оборудования и высокая производительность методов газопламенного напыления позволяют наносить покрытия на поверхности больших размеров даже в полевых условиях. В качестве топлива используются ацетилен, водород, пропан и другие горючие газы. Схема газопламенного напыления приведена на рис. 9.13.

При газопламенном напылении используются порошковые и проволочные материалы (рис.9.13) как с низкой, так и высокой температурой плавления (до 2000 °С), т.е. большинство металлов и некоторые керамики. Толщина покрытий от 0,1 до 30 мм. Порошковое газопламенное напыление имеет определенные преимущества перед проволочным, поскольку диапазон наносимых покрытий шире. Оно обладает следующими особенностями:

высокая экономичность, большой срок службы и надежность оборудования;

простота использования;

сравнительно низкий шум;

универсальность в применении;

широкий диапазон материалов, используемых для формирования покрытий;

высокая производительность;

простота автоматизации;

портативность оборудования.

Сверхзвуковое (высокоскоростное) газопламенное напыление (СУ *n) (High Velocity Oxygen-Fuel (HVOF))*- одна из самых перспективных технологий газотермического напыления, разработанных за последние 20 лет. В этой технологии используется принцип работы миниатюрного ракетного двигателя (рис. 9.14). В качестве топлива, подаваемого в камеру сгорания, могут использоваться керосин, водород, пропилен, пропан, ацетилен, природный газ. Из сопла головки вытекает сверхзвуковая струя,

имеющая скорость порядка 2800 м/с и температуру до 2800 ... 3000 °С. Порошок наносимого материала подается непосредственно в сопло. Наносимые покрытия выгодно отличаются по своим свойствам (твердости, пористости, прочности сцепления) от подобных покрытий, полученных другими способами газотермического напыления. Это обусловлено высокими скоростями и малым временем взаимодействия частиц порошка с поверхностью, невысокими температурами частиц и пониженным окислением. Широкое применение в аэрокосмической промышленности этот процесс получил в связи с разработкой нового поколения технологического оборудования.

Технология высокоскоростного газопламенного напыления применяется в основном для получения покрытий системы WC-Co (рис.4.29), и в первую очередь потому, что в этом случае не требуется расплавления порошка, достаточно размягчить кобальтовую связку. Высокая скорость взаимодействия частиц с поверхностью без их перегрева обусловливает качество покрытий.

Электродуговое напыление - простой, экономичный способ получения покрытий, в основе которого лежит плавление материала электрической дугой и его распыление сжатым воздухом. Две проволоки, подключенные к электрическому источнику питания, с контролируемой скоростью подаются в рабочую головку. Современные устройства для дугового напыления обеспечивают автоматический контроль подачи проволок и условий дугообразования.

Плазменное напыление (Atmospheric Plasma Spray (APS)) является наиболее гибким из всех способов термического напыления, поскольку процесс происходит при температурах, достаточных для плавления любых материалов. Плазмотрон (рис. 9.15) состоит из катода (электрод) и анода (водоохлаждаемое сопло), отделенных друг от друга небольшой камерой. При подаче постоянного тока между анодом и катодом образуется электрическая дуга. В это время через камеру подается поток газа. В

результате ионизации газовой среды возникает плазменная струя. Когда нестабильная плазма снова превращается в газовое состояние, выделяется тепловая энергия. Вследствие присущей плазме нестабильности ионы в плазме быстро рекомбинируются. В точке, где происходит рекомбинация ионов, температура может колебаться от 600 до 16000 °С. Вводимый покрывающий материал плавится и переносится струей на подложку.

Типичными плазмообразующими газами являются водород, азот, аргон и гелий. Обычно используют смеси этих газов (2 ... 4 газа), что позволяет, регулируя величину тока, управлять количеством энергии, выделяющейся в плазменной системе, с целью обеспечения повторяемости и наилучшего качества покрытия. Кроме того, могут изменяться место и угол, под которым материал вводится в плазмотрон, а также дистанция напыления. Это дает возможность управлять параметрами плазменной струи, условиями плавления и переноса материала. Расстояние от среза сопла плазмотрона до подложки устанавливается из условия поддержания на поверхности необходимой температуры (обычно 40 ... 260 °С).

Плазменное нанесение покрытий имеет следующие особенности и преимущества:

получение плотных и малоокисленных покрытий, обладающих высокой прочностью сцепления с основой;

высокая производительность при нанесении как металлических, так и керамических материалов;

высокий коэффициент использования материала: не менее 70% для металлов и 50% для оксидных керамик;

сравнительно низкие эксплуатационные расходы, особенно при использовании сжатого воздуха вместо инертных газов;

напыление производится в защитных кабинах фильтровентиляционной системой.

Плазменное напыление при низком давлении (Low Pressure Plasma Spray (LPPS)) и вакуумное плазменное напыление (Vacuum Plasma Spray (VPS))

используются, в частности, для нанесения покрытий систем MCrAIY. Эти покрытия широко применяются для обеспечения жаростойкости компонентов газовых турбин в авиационных двигателях и энергетических установках. Процессы выполняются в вакуумных камерах при давлении 40 ... 60 мбар. Как все процессы термического напыления процесс LPPS является локальным. Нанесение производится с помощью манипулятора, расположенного внутри камеры и перемещающего детали относительно плазменной струи. Детали предварительно нагреваются до температуры 800 ... 1000 °С. Перед плазменным напылением детали обычно обрабатывают электрическим дуговым разрядом с целью удаления окислов и загрязнений, которые могут присутствовать на поверхности. Управление нанесением покрытия производится компьютерным контролем параметров плазменной струи и перемещением детали. Преимуществами способов LPPS и VPS перед другими способами плазменного напыления являются: формирование плотных беспористых покрытий (плотность покрытий выше, чем 98 %);

отсутствие окисления;

высокая прочность сцепления с подложкой;

экологическая чистота процесса.

Детонационное напыление (ДНП) - прогрессивная технология, позволяющая получать твердые, жаропрочные, коррозионно-стойкие и износостойкие покрытия толщиной от 10 мкм до нескольких миллиметров на поверхностях из различных материалов, в том числе на тонкостенных изделиях из черных и цветных металлов, реактопластов, керамики, стекла и др. без их деформации и термического разрушения. Нанесение покрытий производится с использованием специального оборудования - автоматического детонационного комплекса (АДК). Характерной особенностью детонационных покрытий является высокая плотность (пористость < 2 %) и прочность сцепления с материалом подложки ($\sigma_{сц} > 100$ ... 150 МН/м^2).

Детонационным способом наносят покрытия из:

металлов (Fe, Ni, Cr, Al, Mo, Co, Cu, Ti, W и др.);

сплавов на их основе, в том числе самофлюсующихся (NiCrBSi, NiBSi, CoNiCrBSi);

керамики (оксидов Al_2O_3, NiO_2, Cr_2O_3, ZrO_2 и их композиции);

твердых сплавов (на основе карбидов W, Cr, Ti и др. с применением в качестве связки 8 ... 30 % кобальта, никеля или хрома);

металлокерамики (карбиды, нитриды, бориды, силициды переходных металлов);

сверхтвердых материалов, включая алмазосодержащие (плакированные Ni и Cu).

Эти материалы применяются исключительно в виде порошков, размер частиц которых составляет *2* ... 150 мкм.

Процесс ДНП можно представить следующим образом. Ствол детонационной установки (рис. 9.16) заполняют взрывчатой газовой смесью. Затем в него подают порцию напыляемого материала. У дульного среза ствола располагают подложку. После этого инициируют взрыв (детонацию) газовой смеси, например, электрическим разрядом. Детонация представляет собой процесс химического превращения взрывчатого вещества, сопровождаемый распространением по нему зоны горения в виде детонационной волны. Последняя движется со скоростью, превышающей скорость звука в данном веществе. Для ацетиленокислородных смесей скорость детонации находится в пределах 2000 ... 3000 м/с. Выделение тепла, которым сопровождается детонация, вызывает нагрев (до 3000 ... 3500°С) и расширение газообразных продуктов, вследствие чего они под большим давлением (до 200 МПа) с большой скоростью истекают из ствола. В результате термического и ударного взаимодействия частиц с подложкой на ней закрепляется основная масса порошка, т.е. формируется слой детонационного покрытия.

Особенностью процессов, протекающих при ДНП, является их чрезвычайно малая длительность. Так, детонация взрывчатой смеси,

заполняющей ствол, завершается примерно через 0,5 мс после ее инициирования; продолжительность динамического и теплового воздействия газового потока на порошок обычно не превышает 3 мс.

Состав взрывчатой смеси и степень заполнения ствола существенно влияют на энергетические характеристики продуктов детонации.

От процентного соотношения горючего, окислителя и разбавителя, а также от их объема зависит:

количество тепла, выделяющегося при детонации;

степень термической диссоциации продуктов детонации;

химическая активность продуктов детонации по отношению к наносимому материалу;

температура и скорость истечения из ствола газового потока, воздействующего на порошок.

За каждый цикл (выстрел) формируется слой покрытия толщиной 5 ... 20 мкм. Размер пятна и его форма определяются внутренним сечением выходной части ствола и обычно копируют его. В случае круглого ствола, который используется наиболее часто, пятно имеет форму круга. Если придать выходной части ствола форму овала (это обычно делается с помощью насадок и необходимо при напылении покрытия на отдельные участки изделия), то пятно примет соответствующую размытую форму.

Последовательными выстрелами наращивается покрытие нужной толщины, которая может быть и более 1 мм, но обычно колеблется в интервале 50 ... 150 мкм.

ДНП позволяет добиться шероховатости 0,8 ... 1,6 мкм, что дает возможность в ряде случаев обойтись без механической обработки нанесенных покрытий.

Коэффициент использования порошкового материала составляет 40 ... 60 %, скорострельность достигает 50 Гц (пропан-бутановые газовые смеси).

Характеристики некоторых наиболее часто используемых покрытий, наносимых способом ДНП, приведены в табл. 9.1.

Следует отметить, что после нанесения покрытий методом ДНП, так же как и другими высокотемпературными методами, при остывании в системе «покрытие-основа» возникают внутренние напряжения, часть которых снимается за счет разрыва некоторых из этих связей и частичного ослабления прочности сцепления. При толщинах до 100 мкм прочность сцепления обычно в 1,5 ... 2,0 раза выше, чем приведенные в таблице данные.

Таблица 9.1 - Характеристики некоторых наиболее часто используемых покрытий

Характеристики покрытий	**Составы покрытий**					
	Ni	**WC + +Co(Ni)**	**$A1_2O_3$**	**$A1_2O_3$ + + TiO_2**	**Cr_3C + Ni(NiCr)**	**ZrO_2 + + Ni(Cr)**
Твердость, HRC	30	60... 70	60. ..68	50...60	40... 80	55...60
Прочность сцепления с основой, МПа	100	100	30	30	80	60
Пористость, %	0,5	0,5	1,5	1,0	1,0	1,5
Максимальная температура эксплуатации, °С	723	740	1270	1270	1170	1470
Рекомендуемая толщина покрытия, мкм	50... 200	15...500	50... 500	50 ...500	100…300	100…300

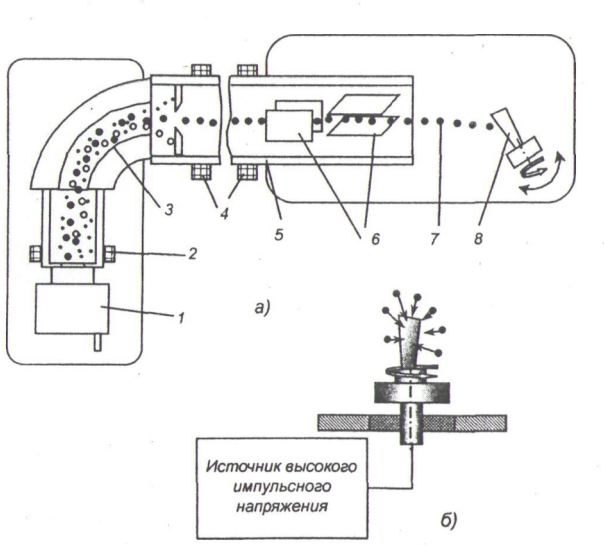


Рисунок 9.18 - Схема установки для ионной имплантации с линейным ускорителем (а) и 3D – имплантация (б):

1 – источник ионов; 2 – система вытягивания ионов; 3 – сепаратор; 4 – фокусирующие магниты; 5 – линейный ускоритель; 6 – электростатическая отклоняющая система; 7 – поток ионов; 8 – упрочняемые детали.

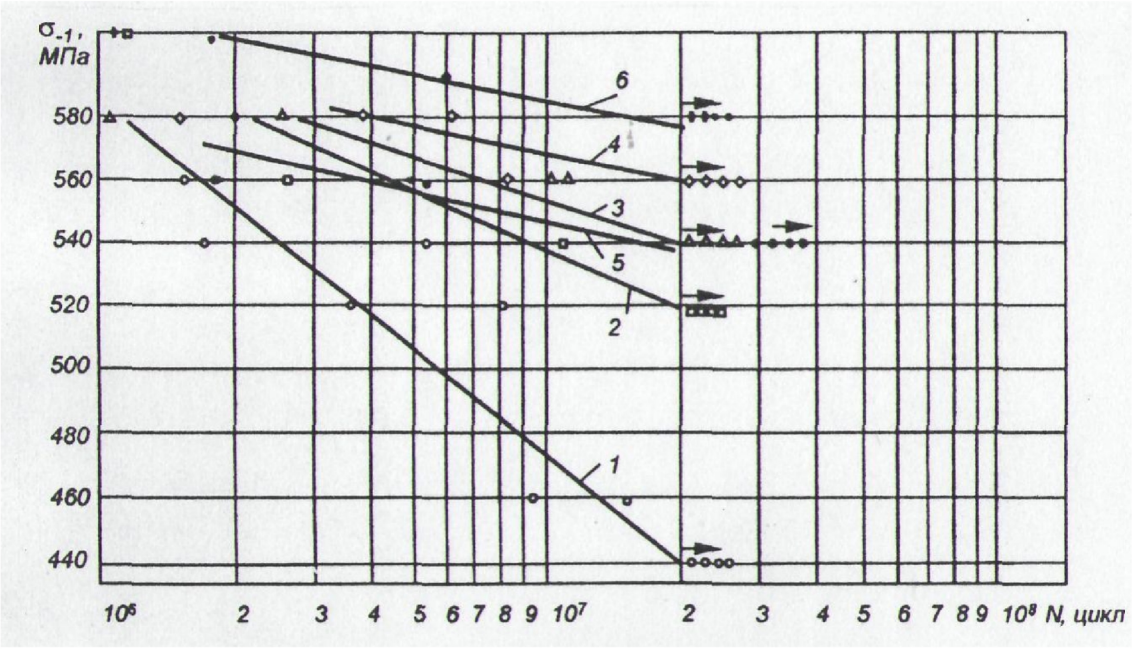


Рисунок 9.19 – Изменение усталостной прочности лопаток IV ступени КВД из сплава ВТ18У после ионной имплантации поверхности $(T = 20^0 C, f = 1000 Гц)$:

1-виброполирование; 2,3,4 – ионная имплантация ионами N^+, C^+, B^+; 5 – обработка без виброшлифования + ионная имплантация ионами N^+; 6 – ионная имплантация N^+ +отжиг в контролируемой атмосфере

Ионная имплантация является сравнительно новым способом физико-химического модифицирования, основанным на внедрении ускоренных ионов легирующих элементов в поверхностный слой. Имплантируемые ионы имеют малую глубину проникновения, однако их влияние распространяется намного дальше от поверхности.

Можно выделить следующие особенности ионной имплантации:

возможность формирования на поверхности сплавов, которые нельзя получить в обычных условиях из-за ограниченной растворимости или диффузии компонентов. В ряде случаев равновесные пределы растворимости превышены на несколько порядков;

легирование не связано с диффузионными процессами, за исключением модифицирования материалов ионной имплантации при большой плотности тока, когда наблюдается радиационно-стимулированная диффузия компонентов;

процесс протекает при низких температурах (менее 150 °С), без изменения механических свойств материала. Метод позволяет обрабатывать термочувствительные материалы;

отсутствует заметное изменение размеров деталей после имплантации;

модифицированные поверхности не требуют дальнейшей финишной обработки;

процесс хорошо контролируется и воспроизводится;

экологическая чистота процессов;

упрочняются только открытые поверхности, непосредственно находящиеся под воздействием облучения ионами;

малая глубина модифицированного слоя;

относительно высокая стоимость оборудования.

Различают имплантации ионным лучом (рис. 9.18, *а)* и ионами плазмы (рис. 9.18,б).

Установка для имплантации ионным лучом содержит источник ионов *1*, систему «вытягивания» ионов *2,* сепаратор ионов *3,* магнитные фокусирующие линзы *4,* линейный ускоритель *5,* электростатическую отклоняющую систему *6.* На практике используются различные по конструкции источники ионов непрерывного и импульсного действия, генерирующие ионы газов (от водорода до криптона) и металлов (с горячим и холодным катодом, магнетронный, диаплазмотрон и др.). Выходящие из источника ионы неоднородны по составу. Для отделения посторонних ионов используется магнитный масс-сепаратор, который отклоняет от основной оси ионы, имеющие другую массу и заряд. «Очищенный» ионный луч фокусируется и ускоряется в линейном ускорителе. Сканирование ионного луча по поверхности упрочняемой детали производится отклоняющей системой *6.* Для обеспечения равномерности упрочнения деталь вращается и поворачивается относительно луча.

Ионная имплантация ионами плазмы - иногда ее называют 3D имплантация - выполняется в вакуумных камерах, где тлеющим или дуговым разрядом создают ионизированную среду, а на деталь подается импульсное высокое напряжение, обеспечивающее ускорение ионов в направлении бомбардируемых поверхностей. Высокоэнергетический ионный поток может формироваться непосредственно в процессе горения импульсного самостоятельного разряда между заземленной вакуумной камерой и изделием, являющимся катодом. Ионы, ускоренные в поле прикатодного падения малой толщины, эффективно модифицируют поверхность изделия, которое может иметь сложную объемную форму. Падающие ионы генерируют электронный пучок с поверхности изделия, который, взаимодействуя с плазмой, обеспечивает самоподдержание разряда. Этот метод имеет определенные преимущества перед лучевыми методами за счет простоты и относительно низкой цены реализации технологических

процессов. Он может сочетаться с другими ионно-плазменными методами обработки, такими, как магнетронное, вакуумно-дуговое и плазменно-термическое напыление, ионное азотирование и др.

При высокоэнергетической ионной имплантации для упрочнения металлов и сплавов, керамик, полимеров используются ионы газов с энергией до 100 кэВ.

Обработка высокоэнергетическими ионами азота эффективно повышает стойкость режущего и штампового инструмента, усталостную прочность деталей.

Имплантация атомов внедрения (азот, углерод и бор) способствует повышению износостойкости и сопротивления усталости сталей. Эти элементы обладают свойством сегрегации к дислокациям даже при комнатной температуре, что блокирует их движение и упрочняет поверхностный слой, а это в свою очередь препятствует развитию усталостных трещин. На рис. 9.19 приведены результаты исследований влияния ионной имплантации на усталостную прочность лопаток из сплава ВТ18У, выполненных в Уфимском авиационном университете. При ионной имплантации никеля бором усталостная прочность увеличивается более чем на 100 %.

Установлено, что увеличение усталостной прочности обусловлено не действием остаточных напряжений сжатия, возникающих при ионной имплантации, как считалось раньше, а торможением развития усталостных трещин вследствие снижения подвижности дислокаций.

Для повышения антифрикционных свойств может выполняться имплантация ионов молибдена и двойного количества ионов серы. Совместная имплантация может стать новым методом формирования антифрикционных и других специальных легированных слоев.

Имплантируя титан, получают на поверхности аморфную фазу Ti-C-Fe, что приводит к снижению трения и износа.

Ионная имплантация широко используется для повышения коррозионной стойкости стальных деталей. С этой целью имплантируют ионы Cr, Mo, Ti, Cr-P, Cr-Mo, Ta-Cr-P и др. при энергиях 50 ... 150 кэВ дозами $5 \cdot 10^{16}$... $2 \cdot 10^{17}$ $см^{-2}$. Увеличение сопротивления коррозии объясняется формированием на поверхности пассивирующих пленок, в частности фосфатных.

Композиционные материалы.

Это искусственно созданные материалы, состоящие из двух и более разнородных нерастворимых друг в друге компонентов, соединённых между собой физико-химическими связями и обладающие характеристиками, превосходящие средние показатели составляющих его компонентов.

Композиты состоят из:

- арматуры (наполнитель);
- связывающей (матрица).

Все композиты получили название в зависимости от типа матрицы:

1. Полимерные композиты (ПКМ).

Матрица может быть эпоксидная на основе кремний-органических смол, на основе полиэфирных смол.

2. Металлические композиты (МКМ).

Матрица Al, Mg, Ti, Ni, жаропрочные сплавы.

3. Керамические композиты (ККМ).

4. Углерод-углеродные композиты (УУКМ). Углерод различных модификаций.

Матрица выполняет функцию среды, в которой распределяется наполнитель. Причём она обеспечивает работу наполнителя за счёт собственной жёсткости.

Наполнитель воспринимает основные напряжения и придает прочность композиционным материалам, а также жёсткость в направлении ориентации волокон.

В качестве наполнителя могут быть различные органические волокна (органопластики, получаемые на основе ароматических полиамидов), углеродные волокна (высокопрочное гидратцеллюлозное волокно), борные волокна (получаются путем газофазного осаждения бора на разогретую вольфрамную проволочку диаметром 0,015 нм), керамические волокна (карбид кремния, окись алюминия, двуокись Zr), металлические волокна (W, Ti, Be, нержавеющие стали), нитевидные кристаллы (SiC, Al_2O_3, SiN).

10. ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ МОДИФИЦИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Ключевые технологии и новые материалы всегда играли решающую роль в истории цивилизации: можно обнаружить кардинальные отличия века каменного и бронзового, века пара и электричества, атомной энергетики и информатики и др. Эксперты утверждают, что XXI век будет веком нанонауки (как совокупности знаний о свойствах материала в нанометровом масштабе размеров) и нанотехнологий - как искусства создавать и управлять объектами с размерами от долей до сотен нанометров. Не случайно уже 2002 г. на наноисследования только в США было потрачено около 1,5 млрд долларов (это в три раза больше, чем бюджет всей фундаментальной науки в России). Специалисты считают также, что по сравнению с сегодняшней тотальной компьютерной революцией последствия нанотехнологической революции будут обширнее и глубже.

На рис. 10.1 применительно к такому техническому объекту как поверхность детали показан принципиальный базис нанотехнологии получения наноструктурированного материала поверхности. Основным фундаментом является физика и химия. При этом нанотехнология подразумевает интеграцию фундаментальных знаний в области физического материаловедения, химического синтеза и высокотехнологичных способов получения наноструктурированных материалов. К этим способам применительно к поверхности можно отнести ионную имплантацию и вакуумно-плазменную конденсацию веществ в (или на) поверхность. При этом реализуется один из принципов нанотехнологии: создание объекта осуществляется не «сверху вниз» (например, когда при формообразовании снимается припуск с заготовки), а «снизу вверх», когда поверхность «достраивается» до необходимых размеров детали.

Следует отметить, что получение материала с нанометрическими размерами структурных составляющих не самоцель. Установлено, что чем

меньше частица (молекулы, атомные кластеры и др.), тем сильнее проявляются квантовые свойства; однако резкое изменение свойств наночастиц по сравнению с макро- объемами для одного и того же материала наступает задолго до проявления квантовых закономерностей - при размерах 10... 100 нм.

Рисунок 10.1 Принципиальный базис нанотехнологии получения наноструктурированного материала в поверхностном слое

Причин появления размерных эффектов несколько. Например, с уменьшением размера зерна (наночастицы) доля атомов, находящихся в приповерхностном слое возрастает. Кроме этого, в результате ненасыщенности связей на поверхности наночастицы могут произойти атомная перегруппировка; это приведет к изменению расположении атомов.

Но поскольку свойства атомов, находящихся на поверхности отличаются от свойств «объемных», то выше сказанное в определенной мере может быть объяснением наличия размерного эффекта. Можно также отметить, что в любом явлении переноса (например, теплопроводность, диффузия, пластическая деформация), носитель имеет некоторую эффективную длину свободного пробега. Если размер частицы (зерна) будет во много раз больше длины свободною пробега, то продвижение носителя (или рассеяние, захват, гибель) будет осуществляться в пределах объема и слабо будет зависеть от геометрических факторов объекта. И наоборот, если размер наночастицы будет значительно меньше длины свободно го пробега носителя, то ситуация кардинально изменится и перенос будет существенно зависеть от размеров нанообъекта.

Согласно уравнению Пэтча-Холла,

$$\sigma_T = \sigma_0 + K/\sqrt{d}$$

предел текучести $\sigma_т$ увеличивается с уменьшением размера зерна d. Однако в настоящее время выяснилось, что в области d < 50 нм зависимость «перестает» работать. Из рис. 10.2 видно, что начиная примерно с 50 нм закон Петча-Холла нарушается: с уменьшением наночастиц прочностные свойства снижаются; для различных материалов это снижение различно.

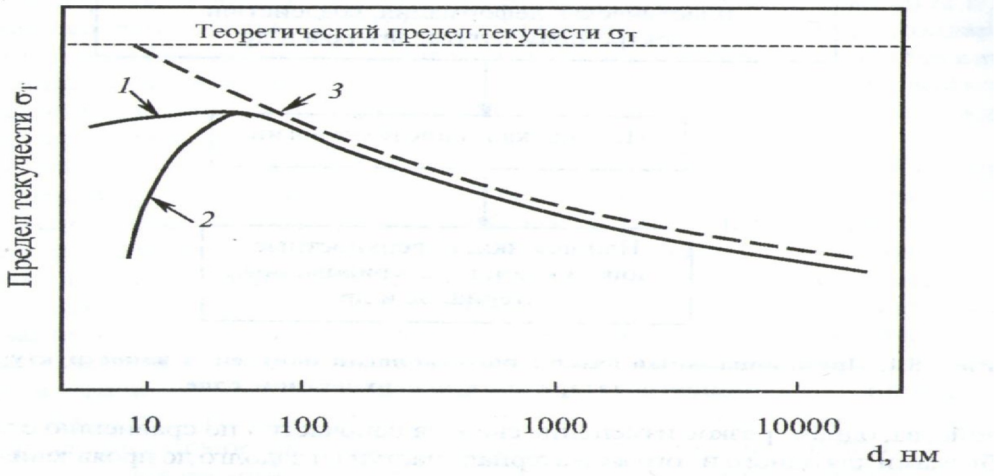


Рисунок 10.2 – Зависимости предела текучести от размера зерна в материале: 1 и 2 – экспериментальные зависимости для различных материалов; 3 – закон Петча – Холла

В самом общем виде изменение физико-химических свойств материала в зависимости от масштаба параметров структуры приведено на рис. 10.3. Как следует из приведенных данных, различные материалы по разному ведут себя (с точки зрения физических характеристик) с уменьшением размера зерен структуры: возможен синусоидальный характер - кривая 2, возможно возрастание характеристик с насыщением - кривая 1, или может наблюдаться рост характеристик с максимумом при некотором значении наноструктуры - кривая 3.

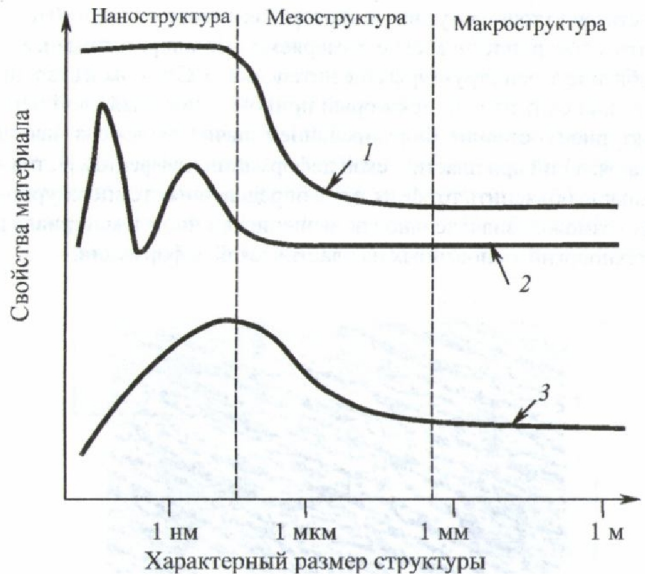


Рисунок 10.3 – Примеры изменения свойств материалов в зависимости от параметров структуры (пояснения в тексте)

Эти данные свидетельствуют о том, что служебные свойства материала существенно зависят от размера зерна и что для различных по природе веществ и материалов это влияние различно, особенно в диапазоне d ≤500 нм.

К специальным методам создания наноструктуры относятся интенсивная пластическая деформация - равноканальное угловое прессование, деформация кручением в условиях высокого давления и др. В отличие от этих специальных методов определенный интерес представляют традиционные технологии формообразования, которые основаны на пластической деформации и разрушении (например, при срезании слоя

лезвийным инструментом или абразивным зерном) или технологии деформационного упрочнения (например, алмазное выглаживание, дробеструйное упрочнение). Ввиду малости локальной области и чрезвычайно высокой скорости и степени деформации в металле поверхностного слоя протекают кардинальные структурно-фазовые изменения. Из рис. 10.4 следует, что при обычном фрезеровании замка турбиной лопатки интерметаллидная γ'- фазаNi$_3$(A1.Ti), имеющая в исходном состоянии размер d = 0,2÷2 мкм на глубине от поверхности 2÷5 мкм раздроблена настоль ко, что выявить ее размеры электронной микроскопией (при увеличении до 10000) достаточно точно не удается; экспертная оценка - это ≤ 100 нм. Следует сказать, что в поверхностном слое, измеряемом не микрометрами, а нанометрами, дробление зерен структуры еще интенсивнее. С высокой степенью вероятности можно считать, что некоторый приповерхностный слой переходит в наноструктурное состояние. Формированием значительных сжимающих остаточных напряжений при пластической деформации и эффектом Петча - Холла, видимо, можно объяснить тот факт; что в определенных температурно-ресурсных зонах возможно значительное повышение прочности материала при реализации технологий, основанных на пластической деформации.

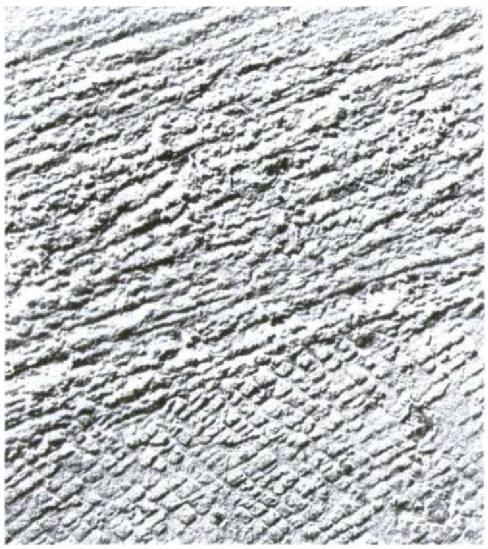


Рис. 10.4. Изменение структуры
но глубине поверхностного слоя

И вместе с тем данные рис. 10.3 показывают, что к различным металлическим материалам (по химическому и структурно-фазовому составу и др.) следует проявлять осторожность, ибо измельчение зерен в ряде случаев может привести к отрицательным последствиям с точки зрения прочности материала. Но поскольку при всех основных технологических способах формообразования наибольшая степень пластической деформации имеет место в тонком приповерхностном слое - до 1 мкм, то следует, что необходимо знать свойства слоя металла толщиной 1+1000 нм.

Именно в этом слое атомарные процессы, происходящие в тонких приповерхностных слоях и приводящие в том числе к образованию несплошно- стей и трещин атомного масштаба, определяют служебные свойства изделия, его долговечность, химическую активность, эмиссионную способность и др. Несмотря на это, следует признать, что физико-химические свойства металла поверхностного слоя указанной толщины мы не знаем. При конструировании и инженерных методах расчета используется хорошо разработанная континуальная теория сплошных сред. Процессы упрочнения, разупрочнения и разрушения и др. изучаются феноменологически на макроуровне, что приводит к усреднению характеристик. Например, при исследовании остаточных напряжений рентгеноструктурным методом вследствие проникновения рентгеновских лучей на глубину 2÷10 мкм происходит усреднение **напряжений** в слое этой толщины, хотя хорошо известно, что в пределах этого слоя имеет место значительный градиент напряжений. Или трудоемкие микромеханические испытания плоских образцов толщиной всего 20÷30 мкм. хотя и дают некоторую информацию о механических свойствах металла поверхностного слоя, но также следует признать, что это достаточно грубое усреднение, ибо в пределах 30 мкм по глубине детали в несколько раз меняется интенсивность деформации (при технологическом воздействии), величина технологических напряжений и др.

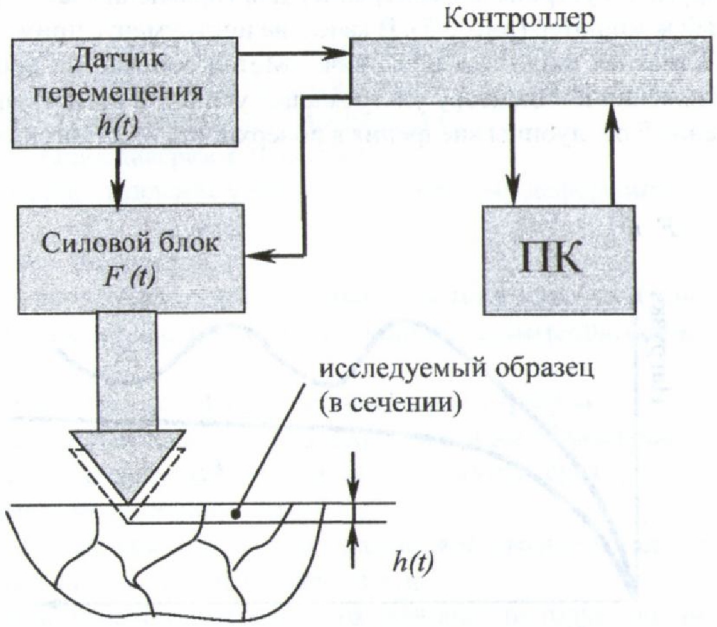


Рисунок 10.5 – Принципиальная схема нанотестирования поверхности

Из сказанного следует, что реальные физико-химические свойства металла поверхностного слоя толщиной 1÷1000 нм могут быть определены по «правилам» наноматериаловедения, используя нанотехнологии - сканирующие туннельную и атомно-силовую микроскопию, наноиндентирование (индентор движется по нормали к поверхности), наносклерометрию (индентор движется по касательной к поверхности). Приведенные технологии исследования приповерхностных слоев используют атомно-острые иглы, локализующие воздействие в объемах с нанометровыми размерами.

Нанотестеры конструктивно содержат силовой блок, реализующий внедрение индектора в испытываемый материал, датчики перемещения индентора, сканирующее устройство, контроллер для управления всеми узлами, персональный компьютер (рис. 10.5). В качестве инструмента применяется трехгранная алмазная пирамида Берковича. Метод основан на программируемом приложении к индентору ультромалых усилий и регистрации силы сопротивления F от глубины внедрения в поверхность или тангенциально перемещения. Типичная диаграмма при наноскрабировании

схематичного показана на рис. 10.6. в случае наноиндентирования диаграмма «усилие внедрения - глубина погружения» представлена на рис. 10.7.

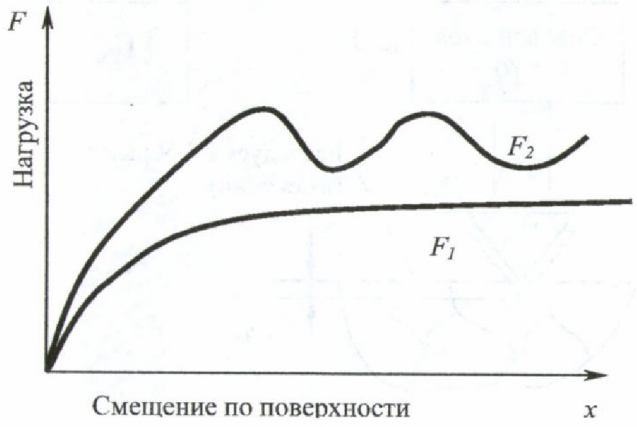


Рисунок 10.6 – Типичные диаграммы «сила-перемещение» при наноскрабрировании; $F_2 \succ F_1$

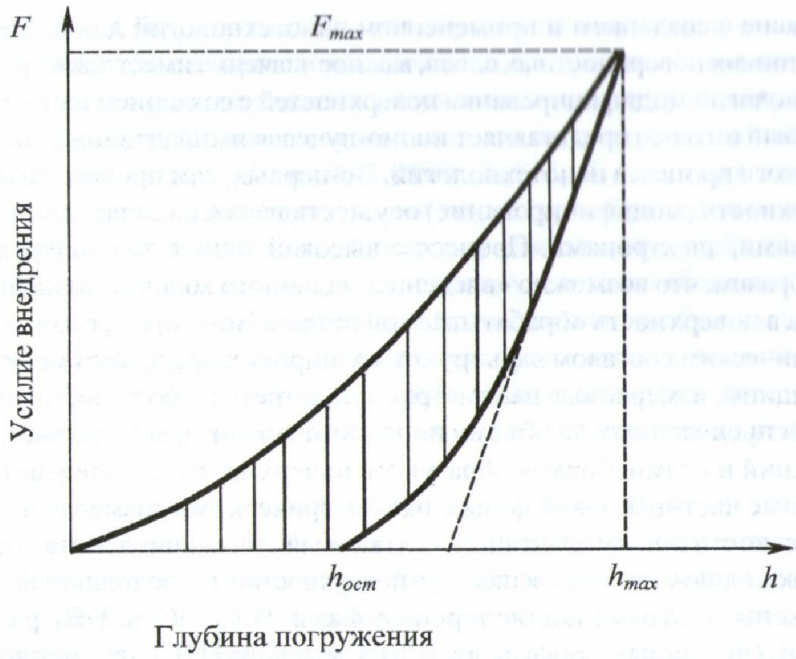


Рисунок 10.7 – Диаграмма «усилие внедрения – глубина погружения» при наноиндентровании (схема)

Обработка таких диаграмм позволяет:

- оценить сопротивление упруго-пластическому деформированию в наноконтакте;

- определить твердость;

- оценить упругопластические характеристики материалов не поддающихся пластическому деформированию (карбиды, нитриды, бориды, карбо- силициды и др.);

- исследовать свойства фаз в многофазных материалах;

- при многократном нагружении одной и той же области моделировать процессы усталости металла в наноприповерхностных слоях;

- определять модули упругости;

- определять прочностные и пластические свойства нанослоев и покрытий;

- оценивать внутренние напряжения и др.

Использование наноиндентирования позволяет не только оценить фактические физико-механические свойства металла поверхностного слоя, но и узнать до каких пор можно опираться на данные, полученные в макроопытах.

Наравне с созданием и применением нанотехнологий для исследования свойств тонких поверхностных слоев, важное значение имеет также разработка нанотехнологий модифицирования поверхностей с созданием наноструктур.

Особый интерес представляет ионно-лучсвая имплантация и создание на основе этого процесса нанотехнологий. Во-первых, сам процесс воздействия на поверхность (модифицирование) осуществляется наночастицами — ионами, атомами, электронами. Процесс с высокой точностью контролируется таким образом, что возможно «введение» заданного количества химического элемента в поверхность обрабатываемой детали. Во-вторых, слои с измененным химическим составом варьируются в широких пределах и могут составлять толщины, измеряемые нанометрами; и, в-третьих, большое число равномерно распределенных по объему ионов имплантанта, вследствие химических реакций и «самосборки» образуют в

поверхностном слое ультрамелкодисперсные частицы новой фазы с нанометрическими размерами.

В частности при имплантации в титановый сплав ионов азота, углерода и бора (реакционно-активных веществ) в поверхностном слое толщиной до 1250А обнаружены ультрамелкодисперсные фазы TiN, TiC и TiB_2 размерами 20...60 нм (поданным профессора А.М. Смыслова). Равномерно распределенные по объему эти фазы обеспечивают кардинальное увеличение усталостной прочности лопаток газотурбинных двигателей. Высказываются несколько факторов, объясняющих это увеличение прочности и долговечности: фазовое упрочнение, твердорастворное и дислокационное упрочнение, формирование сжимающих напряжений и др. Вместе с тем использование такой нанотехнологии, как наноиндентирование, позволило бы оценить истинные физико-механические и пластические свойства металла поверхностного слоя, что в свою очередь позволило бы не косвенно, а напрямую «связать» прочность нанослоя поверхности с прочностью всего макрообъема (детали).

В качестве нанотехнологии может быть рассмотрен новый метод вакуумно-плазменной конденсации веществ на поверхности конструкционных материалов. Схема такого нанесения защитного покрытия приведена на рис. 4.36. Метод позволяет локально и дозировано осуществлять нанесение нанослоев различных веществ на поверхность образца (детали). Как следует из рисунка, за счет изменения скорости вращения и числа оборотов образца вокруг оси приспособления и вращения приспособления вокруг оси вакуумной камеры при прохождении поверхности образца через пучки заряженных частиц нескольких источников ионов возможно нанесение слоев различных толщин с различным химическим составом. В рассматриваемом примере осуществлялось чередование осаждения ионов титана, углерода и кремния. Были получены покрытия общей толщиной 2 мкм, состоящие из 120 нанослоев (толщина нанослоя 16 нм) и 3 мкм, состоящего из 600 нанослоев (толщина нанослоя 5

нм). Следует отметить, что образование конденсированного покрытия осуществлялось при постоянной бомбардировке поверхности ионами аргона. Установлено, что в данных термодинамических условиях (на атомном уровне) в процессе конденсации веществ на поверхности происходит синтез новых фаз -TiC, Ti_2C, SiC, Ti_8C_5, $TiSi_2$, Ti_3SiC_2, Ti_5Si_3C и других наномет-рических размеров. Таким образом, наноструктура образуется не только из нанослоев, но и из новых нанофаз. Поскольку известно, что карбиды, силициды и карбосилициды металлов (в данном случае титана) обладают высокой прочностью, твердостью и коррозионной стойкостью, то образцы (детали) с таким покрытием демонстрируют высокие эксплуатационные свойства. В связи с тем, что в данном слое присутствует в виде наноструктурной составляющей чистый титан, то покрытие обладает высокими адгезией и пластическими свойствами.

В определенной мере к нанотехнологии можно отнести и технологию получения отливок лопаток турбин ГТД с однонаправленной монокристальной структурой (реализуется контролируемая и управляемая кристаллизация). Создание таких деталей связано с тем, что в процессе ползучести при эксплуатационных температурах разупрочнение материала связано со стоком вакансий и дислокаций к границам зерен, ориентированных перпендикулярно к действующим напряжениям. Уменьшение площади границ зерен или вообще их ликвидация приводят к повышению физико-механических свойств.

При получении монокристаллической отливки используется затравочный кристалл. Форма с расплавленным металлом проходит через поле температурного градиента в зоне кристаллизации (2.. ,9°С/мм); это обеспечивает рост кристалла со скоростью 3... 10 мм/мин. Затравочный кристалл устанавливается определенной кристаллографической ориентацией -(001). С точки зрения прочности именно эта ориентация обеспечивает наибольшую прочность охлаждаемых лопаток по отношению к направлению рабочих напряжений (вдоль оси лопатки).

Таким образом, полученная деталь изготавливается не путем удаления припуска с заготовки, как это делается по традиционной технологии, а как бы «выращивается» из сложнолегированного расплава; при этом аэродинамический профиль (перо лопатки) в последующем практически не обрабатывается. Здесь уместно заметить, что в данном случае выдерживается один из принципов нанотехнологии: создание объекта идет не «сверху вниз» (снятие припусков с заготовки вплоть до окончательного размера детали), а «снизу вверх» - от затравочного кристалла происходит «строительство» детали путем присоединения нанообъемов расплава (атомы, молекулы) вплоть до окончательно готовой детали. В рассматриваемом примере нанотехнология предусматривает получение не наноструктрированного материала, а наоборот - получение детали из одного кристалла с заданной кристаллографической ориентацией.

Как видно из приведенных примеров, нанотехнологии относятся к числу наукоемких технологий; при их разработке и реализации необходимо участие специалистов различного профиля, поскольку необходимо решать широкий спектр задач, связанных с физикой плазмы и плазменными источниками, физическим материаловедением, механикой многофазных систем, управлением и многих других. Иными словами создание нанотехнологий возможно только на основе интеграции фундаментальных знаний и высокотехнологичных способов производства. А это требует в свою очередь подготовки принципиально новых специалистов, способных генерировать идеи в междисциплинарной области знаний и осуществлять разработки в области нанотехнологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Качество и надежность авиационного двигателя, численные значения его показателей формируются на основе оптимизации параметров, определяющих свойства изделия применительно к предполагаемым условиям применения, закладываются в процессе обоснования схемных, конструктивных и технологических решений при проектировании, отработке макетного образца и доводке опытных образцов, при отладке технологии, обеспечиваются в производстве в ходе технологических процессов обработки, сборки, технического контроля и испытаний, реализуются и поддерживаются в эксплуатации.

В соответствии с вышеизложенным построена и структура данного учебного курса.

В первой главе рассматриваются основные понятия и определения в теории надежности двигателей летательных аппаратов. Рассматриваются вопросы обеспечения надежности на этапе создания нового двигателя.

Во второй и третьей главах приведены основные зависимости теории надежности и иллюстрируется практическое применение ее законов для анализа этой стороны качества технических систем.

В четвертой главе излагаются методы обеспечения надёжности, рассматриваются инженерно- физические показатели надежности изделий и узлов.

В пятой главе излагаются направления обеспечения надежности ДЛА в условиях серийного производства. Особое внимание уделяется сопутствующим явлениям технологического процесса и технологической наследственности, излагаются методики и виды контроля в серийном производстве.

В шестой главе излагаются методики оценки надежности функционирования современной технологической системы и ее способности обеспечить точность геометрических параметров изготавливаемой продукции.

В седьмой главе представлены материалы по исследованию качества поверхностного слоя деталей, анализу формируемых технологических остаточных напряжений и наклепа, релаксации этих напряжений, влиянию технологии механической обработки на эксплуатационные свойства деталей.

Восьмая и девятая главы посвящены технологическим аспектам создания поверхностей с заданными специальными свойствами, в том числе и с получением защитных покрытий на деталях и узлах ГТД.

В десятой главе излагаются материалы перспективы создания нанотехнологий модифицирования и оценки свойств поверхностного слоя.

Представленный в учебном пособии материал позволяет расширить кругозор студентов и магистрантов в вопросе обеспечения надежности ДЛА технологическими методами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин Ф.И., Проничев Н.Д., Шитарев И.Л. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей. Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2002
2. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей: Учебн. Пособие для вузов / Ю.С. Елисеев, А.Г. Бойцов, В.В. Крымов, Л.А. Хворостухин. – М: Машиностроение, 2003. 512 с., ил.
3. Крымов В.В., Елисеев Ю.С., Зудин К.И. производство газотурбинных двигателей/ под ред. В.В. Крымова. М.: Машиностроение – Полет; 2002. 376 с., ил.
4. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей: Учебн. Пособие / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, К.А. Малиновский, В.Г. попов. – М.: Высш. шк.; 2002. – 355с., ил.
5. Физико- химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей: Учебн. пособие / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, А.А. Митрофанов и др.; под ред. Б.П. Саушкина. – М.: Дрофа, 2002. – 656 с.; ил., 16 с цв. вкл.
6. Моисеев Ю.А., Челышев С.В. Технологическая надежность сложного изделия и ее отработка / Под ред. Ю.С. Соломонова. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 176 с.
7. Елисеев Ю.С., Абраимов Н.В., Крымов В.В. Химико- термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателе строении: Учебн. Пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1999. – 525 л.: ил.
8. Специальные методы обработки и обеспечение ресурса деталей ГТД: лабораторный практикум / Н.Д. Проничев, А.П. Шулепов, К.П. Крашенинников, Г.В. Смирнов, В.Н. Бородин. – Самара: Издательство Самар. гос. аэрокосм. Ун-та, 2006. – 112 с.: ил.