

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Материаловедение в машиностроении»

Е. П. Поздняков

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ИЗДЕЛИЙ

ПОСОБИЕ

**для студентов на первой ступени
высшего образования специальности
1-36 07 02 «Производство изделий на основе
трехмерных технологий»
дневной формы обучения**

Гомель 2022

УДК 669(075.8)
ББК 39.7я73
П47

*Рекомендовано научно-методическим советом
механико-технологического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 5 от 27.05.2021 г.)*

Рецензент: доц. каф. «Технология машиностроения» ГГТУ им. П. О. Сухого
канд. техн. наук, доц. *Г. В. Петришин*

Поздняков, Е. П.
П47 Конструирование и расчет изделий : пособие для студентов на первой ступени высшего образования специальности 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» днев. формы обучения / Е. П. Поздняков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2022. – 213 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Предназначено для теоретической подготовки студентов дневной формы обучения при расчете разнообразных изделий. Рассмотрены вопросы разработки и постановки продукции на производство, влияние внешних факторов на надежность изделий, выбор формы и геометрические показатели деталей, расчет соединений.

Для студентов специальности 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» дневной формы обучения.

**УДК 669(075.8)
ББК 39.7я73**

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2022

Оглавление

Введение	5
Раздел 1. Классификация и свойства конструкционных материалов	6
1.1. Классификация конструкционных материалов	6
1.2. Свойства конструкционных материалов	8
1.3. Схема выбора материала	11
Раздел 2. Разработка и постановка продукции на производство. Основы проектирования	19
2.1. Термины и определения	19
2.2. Стадии разработки новой продукции	26
2.3. Освоение производства	36
2.4. Технический уровень изделий	38
2.5. Патентные исследования	48
2.6. Внешняя форма изделий	50
2.6.1. <i>Элементы деталей и их поверхностей</i>	51
2.6.2. <i>Общие требования к технологичности форм деталей</i>	58
2.7. Выбор базовых поверхностей	62
Раздел 3. Обеспечение качества при конструировании	65
3.1. Допуски формы и расположения поверхностей	65
3.2. Обозначение шероховатости на чертеже	69
3.3. Надежность изделий	77
3.4. Воздействие внешней среды на изделия	86
3.5. Технологическая себестоимость изделия	99
Раздел 4. Причины выхода из строя деталей машин	101
4.1. Трение и изнашивание	101
4.2. Механизм изнашивания	106
4.3. Классификация процессов изнашивания	109
4.4. Изнашивание при избирательном переносе	116
4.5. Усталостное разрушение	119
4.6. Коррозионное разрушение	127
4.7. Влияние физико-механических свойств поверхности	129
4.8. Микрогеометрия	138
Раздел 5. Виды соединений деталей машин	142
5.1. Разъёмные соединения	142
5.1.1. Шпоночные соединения	142
5.1.2. Шлицевые соединения	147

5.1.3. Штифтовые соединения	148
5.1.4. Критерии оптимизации разъёмных не резьбовых соединений	
5.1.5. Условия работоспособности	149
5.1.6. Проблемы проектирования соединений	150
5.2. Резьбовые соединения	152
5.2.1. Основные понятия и определения	155
5.2.2. Классификация резьб	156
5.2.3. Материалы для изготовления резьбовых изделий	159
5.2.4. Расчет одиночных болтов	159
5.2.5. Расчет группы болтов	165
5.2.6. Расчет болтов, подверженных действию переменных нагрузок	168
5.2.7. Расчеты резьбы на прочность	171
5.3. Замковые соединения	172
5.4. Неразъемные соединения	176
5.4.1. Сварные соединения	176
5.4.2. Заклепочные соединения	181
5.4.3. Клеевые и паяные соединения	184
5.4.3.1. Клеевые соединения	184
5.4.3.2. Паяные соединения	189
5.4.4. Соединение деталей с гарантированным натягом	193
Раздел 6. Решение конструкторских задач при помощи компьютерного моделирования	196
6.1. Дискретизация. Конечные элементы. Узлы	199
6.2. Системы отсчёта. Степени свободы	200
6.3. Аппроксимация искомой функции с помощью функции формы	202
6.4. Уравнения жёсткости конечного элемента	205
6.5. Составление общей системы уравнений равновесия всей модели	206
6.6. Задание граничных условий	207
6.7. Решение общей системы уравнений равновесия конечно-элементной модели	208
6.8. Анализ результатов решения	209
Литература	211

ВВЕДЕНИЕ

В процессе проектирования различных деталей машин и механизмов в первую очередь необходимо проводить расчёты на прочность. Неправильный расчёт на прочность даже самой незначительной детали может привести к её разрушению и, соответственно, выходу из строя всей конструкции механизма.

Помимо расчёта на прочность так же необходимо проводить расчёты на жёсткость, устойчивость, надёжность, долговечность в совокупности с экономической целесообразностью изготовления новой машины.

Целью расчётов на жёсткость является определение таких размеров элементов конструкций, при которых перемещения или деформация не превышают заданных (даже очень малых) значений, оговорённых в техническом задании на изготовление изделия. Деформации многих конструкций при действии некоторого вида нагрузок незначительны, пока величины этих нагрузок не превышают допустимые критические значения. При превышении этих значений деформации и перемещения конструкций резко возрастают. Данное качественное изменение характера деформации конструкции при увеличении нагрузок называется потерей устойчивости. Расчёт конструкции, направленной на предотвращение потери устойчивости, называется расчётом на устойчивость.

В процессе работы изделий в заданных режимах и условиях эксплуатации, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования они должны сохранять во времени работоспособное состояние, при котором оно способно качественно выполнять свои функции (с параметрами, установленными в технической документации). Такое состояние изделий называется надёжностью. Проблемой надёжности является постоянное возрастание сложности технических систем и условий их эксплуатации, что удорожает их эксплуатацию.

Износ – основная причина выхода из строя большинства деталей машин. На интенсивность износа существенное влияние оказывают такие факторы, как качество поверхности деталей, наличие смазочного материала, проходящих токов, воздействие внешней среды (температура эксплуатации, давление, влажность).

РАЗДЕЛ 1. КЛАССИФИКАЦИЯ И СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Классификация конструкционных материалов

Конструкционными материалами называют материалы, из которых изготавливаются детали конструкций (машин и сооружений), воспринимающих силовую нагрузку. Определяющими параметрами конструкционных материалов являются механические свойства, что отличает их от других технических материалов (оптических, изоляционных, смазочных, лакокрасочных, декоративных, абразивных и др.). К основным критериям качества конструкционных материалов относятся параметры сопротивления внешним нагрузкам: прочность, вязкость, надёжность, ресурс и др.

Конструкционные материалы подразделяются (рис. 1.1):

- по природе материалов — на металлические, неметаллические и композиционные материалы, сочетающие положительные свойства тех и других материалов;
- по технологическому исполнению — на деформированные (прокат, поковки, штамповки, прессованные профили и др.), литые, спекаемые, формуемые, склеиваемые, свариваемые (плавлением, взрывом, диффузионным сращиванием и т. п.);
- по условиям работы — на работающие при низких температурах, жаропрочные, коррозионно-, окалино-, износо-, топливо-, маслостойкие и т.д.;
- по критериям прочности — на материалы малой и средней прочности с большим запасом пластичности, высокопрочные с умеренным запасом пластичности.

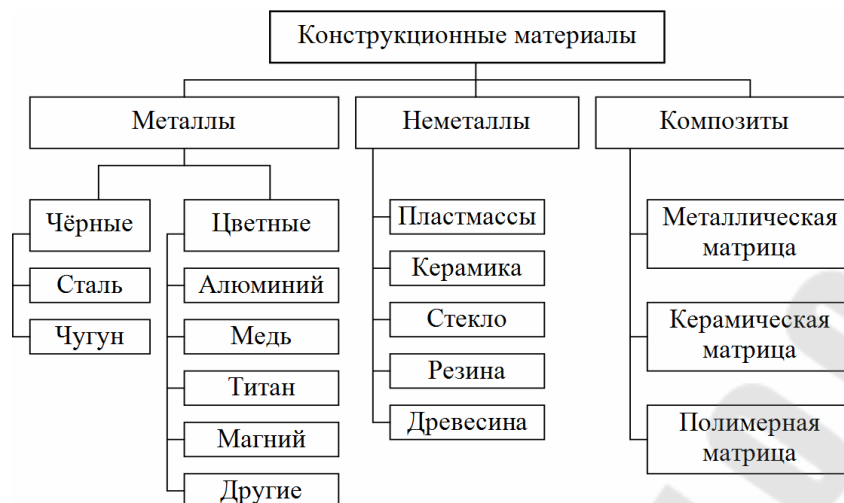


Рис. 1.1. Классификация конструкционных материалов

Развитие техники предъявляет новые, более высокие требования к существующим конструкционным материалам, стимулирует создание новых материалов. С целью уменьшения массы конструкций летательных аппаратов используются, например, многослойные конструкции, сочетающие в себе лёгкость, жёсткость и прочность. Внешнее армирование металлических замкнутых объёмов (шары, баллоны, цилиндры) стеклопластиком позволяет значительно снизить их массу в сравнении с металлическими конструкциями. Для многих областей техники необходимы конструкционные материалы, сочетающие конструкционную прочность с высокими электрическими, теплоизоляционными, оптическими и другими свойствами.

При выборе материала для того или иного изделия или конструкции учитывают экономическую целесообразность его применения (оптимальное соответствие цены и качества), сохранение конструкционных критериев (требуемые долговечность, прочность, надёжность) и возможность переработки в изделие (технологические критерии – обрабатываемость резанием, свариваемость, ковкость и т.п.). С учётом данных критериев выбирают материал той или иной природы.

Металлические материалы. К ним относятся металлы и сплавы на их основе. Они в свою очередь подразделяются на несколько групп, отличающихся друг от друга по свойствам:

1. *Чёрные металлы.* Это железо и сплавы на его основе – стали и чугуны.

2. *Цветные металлы.* В эту группу входят цветные металлы и их сплавы на их основе, такие как медь, алюминий, титан, никель, магний и др.

3. *Благородные металлы.* К ним относятся золото, серебро, платина.

4. *Редкоземельные металлы.* Это лантан, неодим, празеодим.

Неметаллические материалы. Они также подразделяются на несколько групп:

1. *Пластмассы.* Это материалы на основе высокомолекулярных соединений – полимеров, в основном, с наполнителями. Например: полиэтилен, полиамид, поливинилхлорид, акрил, нейлон и др.

2. *Керамические материалы (керамика).* Их основой являются порошки тугоплавких соединений типа карбидов, боридов, нитридов и оксидов. Например: TiC , SiC , Cr_7C_3 , CrB , Ni_3B , TiB_2 , BN , TiN , Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 и др.

3. *Металлокерамические материалы (металлокерамика).* В этих материалах основой является керамика, в которую добавляется некоторое количество металла, являющегося связкой и обеспечивающего такие свойства, как пластичность и вязкость.

4. *Стекло.* Оно представляет собой систему, состоящую из оксидов различных элементов, в первую очередь оксида кремния SiO_2 .

5. *Резина.* Это материалы на основе каучука – углеродноводородного полимера с добавлением серы и других элементов.

6. *Древесина.* Сложная органическая ткань древесных растений.

Композиционные материалы. Они представляют собой материалы, полученные искусственным путём из двух и более различных материалов, сильно отличающихся друг от друга по свойствам. В результате композиция по своим свойствам существенно отличается от свойств составляющих компонентов, т.е. получаемый материал имеет новый комплекс свойств. В состав композиционных материалов могут входить как металлические, так и неметаллические составляющие.

1.2. Свойства конструкционных материалов

Каждая группа этих материалов, их основы и входящих в них дополнительных материалов обладают целым комплексом разнообразных **свойств**:

1. **Механические свойства** характеризуются способностью материала сопротивляться деформированию и разрушаться под действием внешних воздействующих факторов. К ним относятся:

➤ *прочность* – это способность материала сопротивляться разрушению и пластично деформироваться под воздействием внешних нагрузок;

➤ *твёрдость* – это способность материалов сопротивляться деформированию в поверхностном слое при местном контактом и силовом воздействии;

➤ *упругость* – это способность материала восстанавливать свою форму и размеры под действием внешних сил без разрушения;

➤ *вязкость* – способность материала поглощать механическую энергию и при этом испытывать значительную пластическую деформацию до разрушения;

➤ *хрупкость* – это способность материала разрушаться под действием внешних сил, сразу после упругой деформации.

2. Физические свойства характеризуют поверхность материала в тепловых, гравитационных, электромагнитных и радиоактивных полях. К ним относятся:

➤ *свет* – это способность материала отражать световые лучи с определённой длиной световой волны;

➤ *плотность* – это масса единицы объёма вещества;

➤ *температура плавления* – это температура, при которой вещество переходит из твёрдой фазы в жидкую;

➤ *электропроводность* – это способность материала хорошо и без потерь проводить электрический ток;

➤ *теплопроводность* – это способность материала переносить тепловую энергию от более нагретого участка к менее нагретому;

➤ *теплоёмкость* – это способность материала поглощать определённое количество теплоты;

➤ *магнитность* – способность материала хорошо намагничиваться;

➤ *коэффициент объёмного и линейного расширения* – характеризует изменение размеров тела при изменении температуры.

3. Технологические свойства характеризуются способностью материала подвергаться различным видам изготовления изделий – литьём, обработкой давлением, сваркой, обработкой резанием, термической обработкой.

К *литейным* свойствам относятся:

➤ *жидкотекучесть* – способность металлов и сплавов течь по каналам формы и в точности воспроизводить контуры отливки;

➤ *усадка* – способность материала в расплавленном или твёрдом состоянии уменьшаться в размерах.

К основным свойствам, проявляемым при *обработке давлением*, относится *ковкость* – это способность металлов и сплавов подвергаться ковке и другим видам обработки давлением (прокатка, волочение, прессование, штамповка);

К свойствам при получении неразъёмных соединений относится *свариваемость* – это показатель того, на сколько материал способен образовывать прочные сварные соединения.

При обработке материалов *резанием* важно учитывать способность материалов давать короткую ломкую стружку, высокое качество поверхности, не налипать на режущий инструмент и т.п.

При *термической обработке* учитываются такие факторы, как прокаливаемость и закаливаемость.

4. Эксплуатационные свойства характеризуют способность материалов обеспечивать надёжную и долговечную работу изделий в конкретных условиях и эксплуатации. Они базируются на механических, физических, металлургических и технологических свойствах. Эксплуатационные свойства определяют в зависимости от условий работы машины специальными испытаниями. Одними из важнейших эксплуатационных свойств являются усталость, износостойкость, антифрикционность, хладостойкость, жаропрочность и др.

➤ *усталость* – это процесс постепенного накопления повреждений в детали под действием переменных (часто циклических) напряжений, приводящий к изменению свойств материала, образованию трещин, их развитию и разрушению материала детали за указанное время;

➤ *износостойкость* – свойство материала оказывать сопротивление износу, т.е. постепенному изменению размеров и формы тела вследствие разрушения поверхностного слоя изделия при трении. Испытание металлов на износ проводят на образцах в лабораторных условиях, а деталей – в условиях реальной эксплуатации. При испытаниях образцов моделируются условия трения, близкие к реальным. Величину износа образцов или деталей определяют различными способами: измерением размеров, взвешиванием образцов и другими методами;

➤ *антифрикционность* – это способность материала обеспечивать низкий коэффициент трения и тем самым низкие потери на трение и малую скорость изнашивания сопрягаемых деталей;

➤ *хладостойкость* – способность материалов, элементов, конструкций и их соединений сопротивляться хрупким разрушениям при низких температурах окружающей среды;

➤ *жаропрочность* – это способность металла сопротивляться пластической деформации и разрушению при высоких температурах. Жаропрочные материалы используются для изготовления деталей, работающих при высоких температурах, когда имеет место явление ползучести. Критериями оценки жаропрочности являются кратковременная и длительная прочности, ползучесть.

5. Химические свойства характеризуют способность материала вступать в химическое взаимодействие с другими веществами. К ним относятся:

➤ *растворимость* – способность материала образовывать с одним или несколькими веществами однородные системы, называемые растворами;

➤ *жаростойкость* – способность материала противостоять химическому разрушению поверхности под действием воздуха или другой окислительной атмосферой при высоких температурах;

➤ *коррозионная стойкость* – способность металлических материалов противостоять разрушению в результате химического или электрохимического воздействия на их поверхности внешней агрессивной среды (аналогичное свойство для неметаллических материалов – химикостойкость);

➤ *окисление* – способность материалов отдавать электроны, то есть окисляться при химическом взаимодействии с окружающей средой или другой материей.

1.3. Схема выбора материала

Выбор материала — это один из этапов в процессе проектирования конструкции любого изделия. При разработке изделия часто основной целью выбора материала является минимизация затрат при достижении установленных требований к детали, например, высокой жёсткости, малой массы и так далее, в зависимости от назначения изделия. Так, детали теплообменного аппарата, которые разделяют среды, должны иметь высокую теплопроводность, чтобы максимизировать теплопередачу, и низкую себестоимость, чтобы теплообменный аппарат был конкурентоспособным.

Очень важно, чтобы разработчик конструкции обладал глубокими знаниями свойств материалов и их поведения при эксплуатации. Наиболее важными критериями для выбора материалов являются прочность, жёсткость, удельная прочность, теплостойкость, устойчивость к коррозии, обрабатываемость, свариваемость, закаливаемость, электропроводность и др.

Методология выбора материала для изделий, требующих нескольких критериев, является более сложной, чем для одного критерия. Например, для изделия, которое должно быть жестким и легким, требуется материал с высоким модулем упругости и низкой плотностью. Если речь идет о стержне подверженном растяжению, то чтобы определить оптимальный критерий для выбора материала необходима новая характеристика. В данном случае — удельная жесткость — отношение модуля упругости к плотности E/ρ . Если речь идет о балке, работающей на изгиб, оптимальный критерий выбора материала определяется с учетом поперечного сечения, и соответствует отношению \sqrt{E}/ρ . Для легкой и жесткой пластины соотношение примет вид $\sqrt[3]{E}/\rho$, так как прогиб будет зависеть от толщины в третьей степени. Такой критерий выбора материала называется индексом эффективности. Соотношение различных характеристик материала можно представить в виде диаграммы Эшби (рис. 1.2).

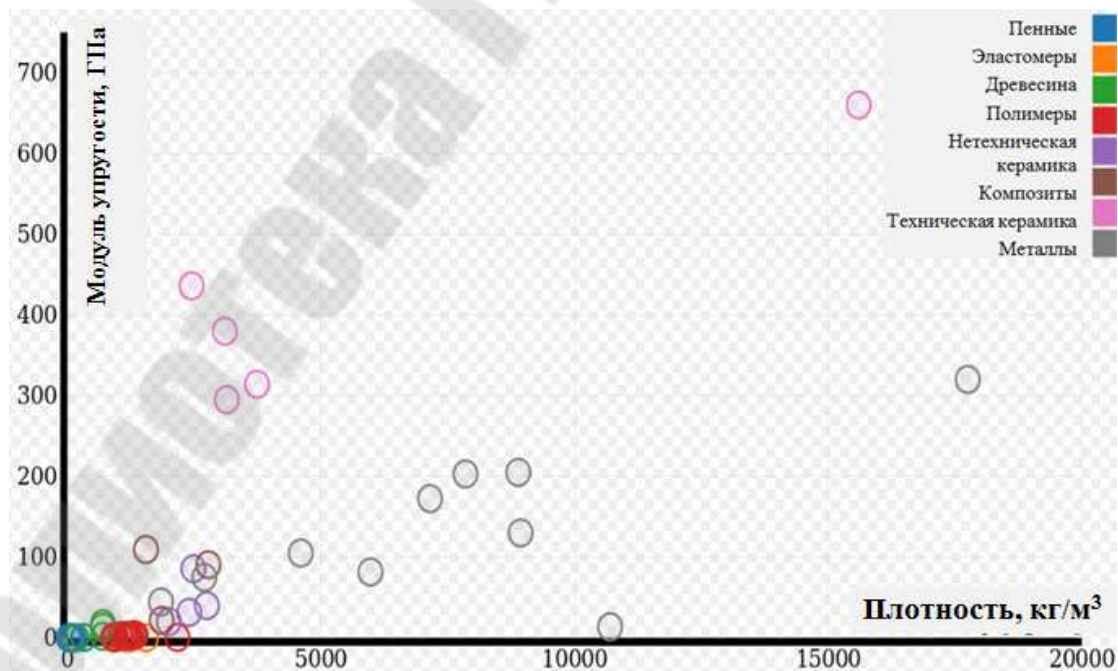


Рис. 1.2. Диаграмма соотношения модуля упругости с плотностью

Диаграмма Эшби представляет собой пузырьковую диаграмму, на которой отображены две или более характеристики материалов или классов материалов. Эти диаграммы используются для сравнения соотношений между различными свойствами материалов. Например, для жесткого и легкого стержня, рассмотренного выше, по одной оси необходимо отложить модуль упругости, а по другой — плотность. На саму диаграмму необходимо нанести овалы, характеризующие разброс свойств материалов-кандидатов (рис. 1.3). На таком графике легко найти не только материал с наибольшей жесткостью, или материал с наименьшей плотностью, но и материал с наилучшим соотношением E/ρ . Использование логарифмической шкалы по обеим осям может облегчить анализ диаграммы и выбор материала.

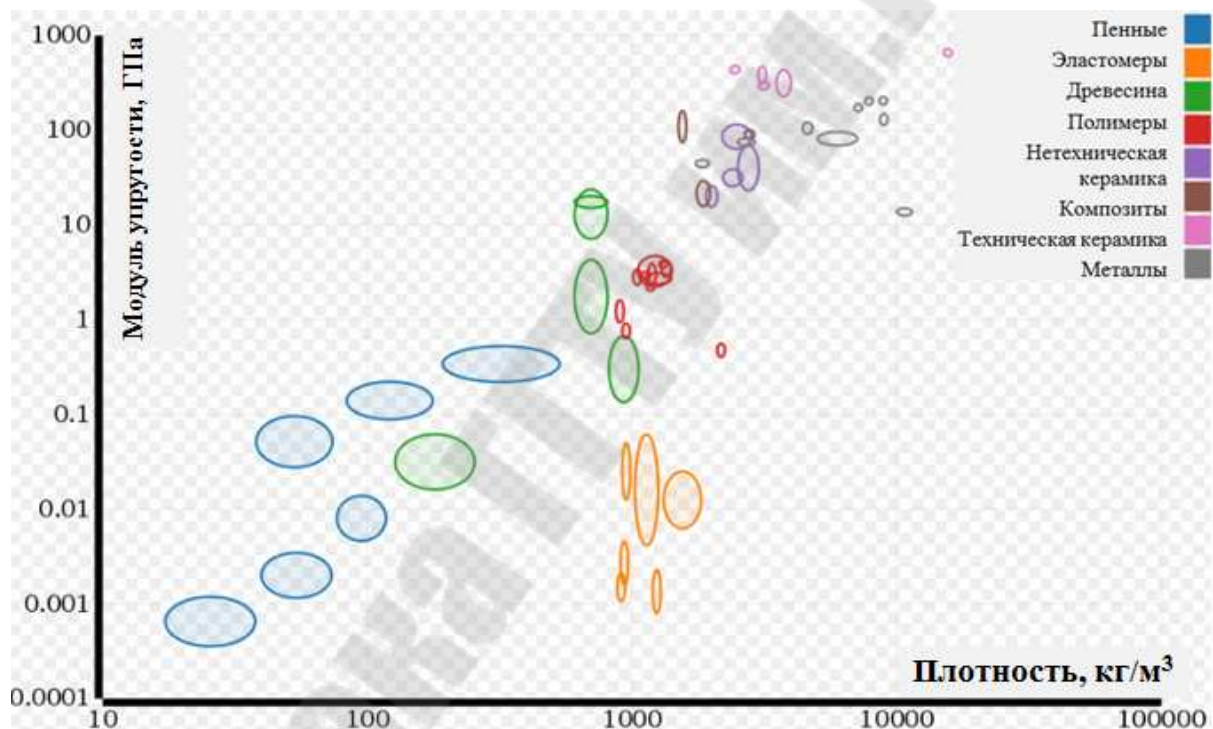


Рис. 1.3. Диаграмма соотношения модуля упругости с плотностью в логарифмическом масштабе

Диаграмма (рис.1.2) показывает соотношение между модулем упругости и плотностью в линейном масштабе. На диаграмме (рис. 1.3) показаны те же самые свойства материалов в логарифмическом масштабе. Разными цветами показаны разные классы материалов (полимеры, пенопласты, металлы и т.д.).

Так, из-за роста цен на топливо и развития новых технологий, в автомобилестроении сталь заменяют легкими магниевыми и алюми-

ниевыми сплавами, в самолетостроении алюминий заменяют на углепластики и титановые сплавы, а спутники уже давно изготавливаются из экзотических композиционных материалов.

Безусловно, цена за единицу массы материала не является единственным значительным фактором при выборе материала. Важной концепцией является отношение индекса эффективности к стоимости единицы массы материала. Например, если при проектировании легкой и жесткой пластины, описанной выше, добавляется ценовой критерий, то потребуется материал с оптимальным сочетанием плотности, модуля упругости и цены. Данное соотношение свойств можно отразить на диаграмме Эшби — по одной оси откладывается соотношение $\sqrt[3]{E/\rho}$, по другой — цена за единицу массы.

Оптимизация нескольких сочетаний свойств материалов и ценовых характеристик является сложным процессом, который трудно осуществить вручную. Поэтому существует необходимость в специальном программном обеспечении, которое будет содержать большую библиотеку свойств материалов, информацию об их стоимости, методологию выбора материала и инструменты анализа.

Обобщенный метод построения диаграммы Эшби. При построении диаграммы для нескольких сочетаний свойств материалов определяются три различных набора переменных:

Переменные материала — это свойства, присущие материалу, такие как плотность, модуль упругости, предел текучести и так далее.

Свободные переменные — величины, которые могут изменяться в процессе проектирования конструкции. Например, в техническом задании не определена длина балки и проектировщик может ее изменить по своему усмотрению.

Фиксированные переменные — это ограничения, налагаемые на конструкцию. Например, строго определенная толщина балки или установленный допустимый прогиб.

Из этих переменных выводится уравнение для индекса эффективности. Это уравнение является критерием выбора материала и количественно определяет, насколько эффективным будет использование материала для конкретного применения. Полученный индекс эффективности наносится на диаграмму. Анализ диаграммы позволяет определить выбор какого материала является наиболее эффективным. Как правило, высокий индекс эффективности показывает более эффективное применение материала.

Пример использования диаграммы Эшби. В этом примере материал подвергается воздействию растяжения и изгиба. Целью выбора материала является определение материала, который будет хорошо работать в обоих случаях нагружения.

Индекс эффективности при растяжении. В первой ситуации на стержень воздействует собственный вес ω и растягивающая сила P . Переменными материала являются плотность ρ и напряжения σ . Предположим, что длина L и растягивающая сила P определены в техническом задании, в таком случае они являются фиксированными переменными. Наконец, площадь сечения A – свободная переменная. В данной постановке целью является минимизация массы ω путем выбора материала с оптимальным сочетанием переменных материала – ρ , σ . Рисунок 1.4 иллюстрирует данную задачу.

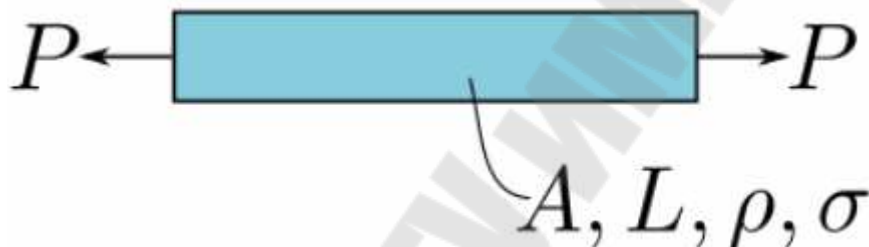


Рис. 1.4. Стержень, воспринимающий растягивающую нагрузку

Напряжение в стержне определяется соотношением P/A , а масса соотношением $\omega = \rho AL$. Для получения индекса эффективности необходимо убрать из соотношения все свободные переменные, оставив только фиксированные переменные и переменные материала. В данном случае из соотношения необходимо убрать площадь A . Уравнение напряжения при растяжении можно выразить как $A=P/\sigma$. При подстановке полученного A в соотношение для массы получим:

$$\omega = \rho(P/\sigma)L = \rho PL/\sigma$$

Далее переменные материала и фиксированные переменные группируются отдельно:

$$\omega = (\rho/\sigma) LP$$

Переменные L и P можно убрать из конечного соотношения, так как они являются фиксированными и их нельзя изменять в процессе проектирования. В таком случае целевое соотношение примет вид

ρ/σ . Поскольку целью является уменьшение массы ω , то полученное соотношение ρ/σ также должны быть сведено к минимуму. Однако, принято, что индекс эффективности является параметром, который максимизируют. Поэтому индекс эффективности примет вид:

$$P_{cr} = \sigma/\rho$$

Индекс эффективности при изгибе. Во второй ситуации материал подвергается воздействию изгибающих моментов. Уравнение максимальных напряжений при изгибе имеет вид

$$\sigma = -M \cdot y/I$$

где M — изгибающий момент;

y — расстояние от нейтральной оси;

I — момент инерции сечения.

Схема приложения нагрузки изображена на рисунке 1.5.



Рис. 1.4. Балка, воспринимающая изгибающую нагрузку

Используя приведенное выше соотношение для массы и решив его для свободных переменных, получится соотношение:

$$\omega = \sqrt{6MbL^2} (\rho/\sqrt{\sigma}),$$

где L — длина;

b — высота балки.

Если b , L , и M — фиксированные переменные, то индекс эффективности при изгибе имеет вид:

$$P_{cr} = \sqrt{\sigma}/\rho$$

Выбор наилучшего материала для двух случаев нагружения. Получено два индекса эффективности: для случая растяжения σ/ρ } и для

случая изгиба $\sqrt{\sigma/\rho}$. Первым шагом необходимо построить диаграмму Эшби, где в логарифмических масштабах отложить по одной из осей плотность, а по другой — прочность и нанести свойства материалов, подвергаемых анализу.

Для случая растяжения $P_{cr} = \sigma/\rho$ первым шагом является извлечение логарифма из обеих частей соотношения. Полученное уравнение можно представить как:

$$\log \sigma = \log \rho + \log P_{cr}.$$

Соотношение имеет вид $y=x+b$. Это означает, что соотношение линейно при отображении в логарифмическом масштабе. Точка пересечения с осью y — это логарифм P_{cr} . Если отложить эту линию на диаграмме Эшби, то все материалы, через которые проходит эта линия имеют одинаковый индекс эффективности. Чем выше положение линии по оси y , тем выше индекс эффективности. В примере значение P_{cr} принято равным 0,1, таким образом, чтобы линия проходила через материал с наивысшим индексом эффективности — карбидом бора (рис. 1.5).

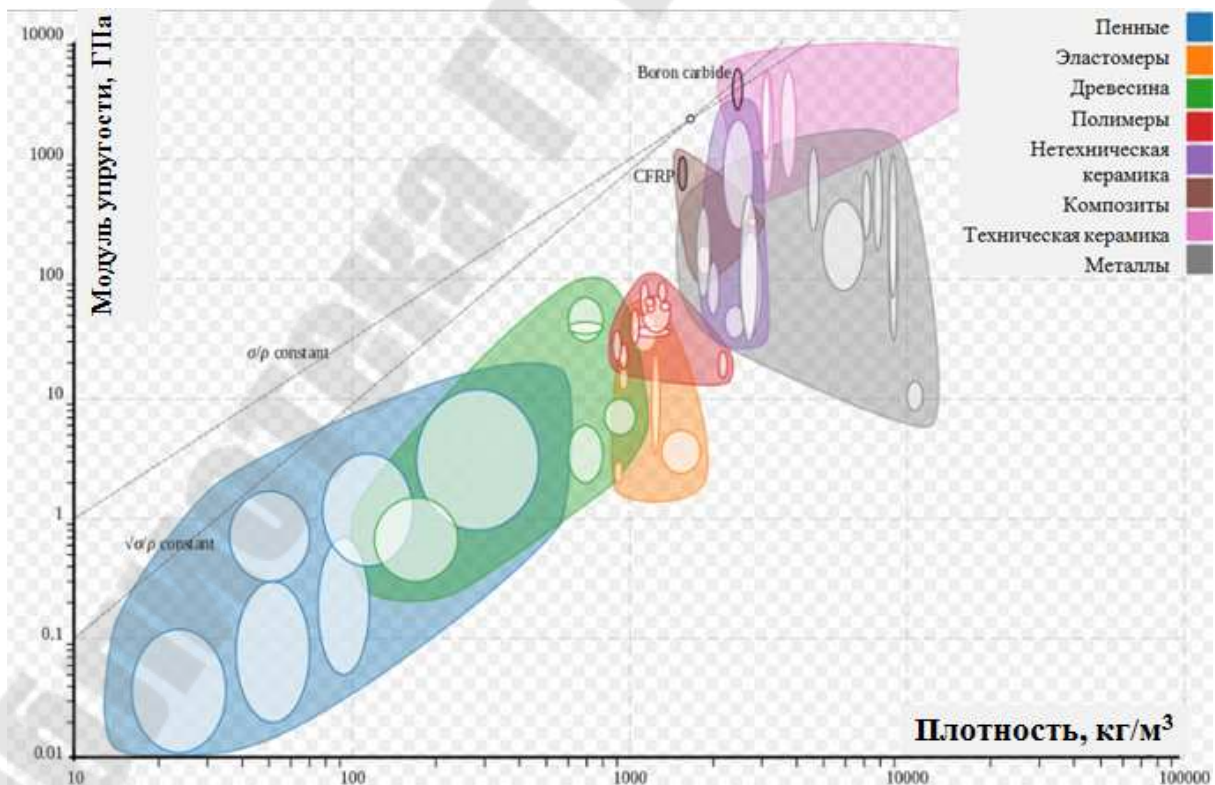


Рис. 1.5. Диаграмма Эшби с индексами эффективности

Используя степенные свойства логарифмов соотношение для изгиба $P_{cr} = \sqrt{\sigma} / \rho$ можно преобразовать аналогичным образом. Соотношение примет вид:

$$\log \sigma = 2 \cdot \log \rho + \log P_{cr}$$

Используя подход, описанный в абзаце выше, получим, что P_{cr} для изгиба составляет $\approx 0,0316$ (рис. 1.5).

Из анализа диаграммы видно, что наибольший индекс эффективности для случая растяжения приходится на карбид бора; для случая изгиба — на пенопласты и карбид бора. Таким образом, наилучшим материалом, работающим в условиях растяжения и изгиба, является карбид бора. Однако, технические керамики являются достаточно дорогими материалами. Принимая во внимание этот факт, наилучшим вариантом будет являться материал, с меньшим показателем индекса эффективности, но более дешевый — углепластик (CFRP).

РАЗДЕЛ 2. РАЗРАБОТКА И ПОСТАНОВКА ПРОДУКЦИИ НА ПРОИЗВОДСТВО. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

2.1. Термины и определения

В Республике Беларусь порядок разработки и постановки продукции на производство регулирует Технический кодекс ТКП424-2012. Но, прежде чем приступить к этапам разработки и постановки продукции на производство, необходимо знать термины и определения.

Согласно ГОСТ2.101-68 к *видам изделий* относят: деталь, сборочная единица, комплект и комплекс. Виды изделий и их структура представлена на рисунке 2.1.



Рис. 2.1. Структура видов изделий

Деталь – изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала, без применения сборочных операций, например: валик из одного куска металла; литой корпус; пластина из биметаллического листа; печатная плата; маховичок из пластмассы (без арматуры); отрезок кабеля или провода заданной длины. Эти же изделия, подвергнутые покрытиям (защитным или декоративным), независимо от вида, толщины и назначения покрытия, или изготовленные с применением местной сварки, пайки, склейки, сшивки и т. п., на-

пример: винт, подвергнутый хромированию; трубка, спаянная или сваренная из одного куска листового материала; коробка, склеенная из одного куска картона.

Сборочная единица – изделие, составные части которого подлежат соединению между собой на предприятии-изготовителе сборочными операциями (свинчиванием, сочленением, клепкой, сваркой, пайкой, опрессовкой, развальцовкой, склеиванием, сшивкой, укладкой и т. п.), например: автомобиль, станок, телефонный аппарат, микромодуль, редуктор, сварной корпус, маховичок из пластмассы с металлической арматурой.

К сборочным единицам, при необходимости, также относят:

а) изделия, для которых конструкцией предусмотрена разборка их на составные части предприятием-изготовителем, например, для удобства упаковки и транспортирования;

б) совокупность сборочных единиц и (или) деталей, имеющих общее функциональное назначение и совместно устанавливаемых на предприятии-изготовителе в другой сборочной единице, например: электрооборудование станка, автомобиля, самолета; комплект составных частей врезного замка (замок, запорная планка, ключи);

в) совокупность сборочных единиц и (или) деталей, имеющих общее функциональное назначение, совместно уложенных на предприятии-изготовителе в укладочные средства (футляр, коробку и т. п.), которые предусмотрено использовать вместе с уложенными в них изделиями, например: готовальня, комплект концевых плоскопараллельных мер длины.

Комплект – два и более изделия, несоединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющих набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера, например: комплект запасных частей, комплект инструмента и принадлежностей, комплект измерительной аппаратуры, комплект упаковочной тары ит. п.

К комплектам также относят сборочную единицу или деталь, поставляемую вместе с набором других сборочных единиц и (или) деталей, предназначенных для выполнения вспомогательных функций при эксплуатации этой сборочной единицы или детали, например: осциллограф в комплекте с укладочным ящиком, запасными частями, монтажным инструментом, сменными частями.

Комплекс – два и более специфицированных изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но

предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций.

Каждое из этих специфицированных изделий, входящих в комплекс, служит для выполнения одной или нескольких основных функций, установленных для всего комплекса, например: цех-автомат; завод-автомат, автоматическая телефонная станция, бурильная установка; изделие, состоящее из метеорологической ракеты, пусковой установки и средств управления; корабль.

В комплекс, кроме изделий, выполняющих основные функции, могут входить детали, сборочные единицы и комплекты, предназначенные для выполнения вспомогательных функций, например: детали и сборочные единицы, предназначенные для монтажа комплекса на месте его эксплуатации; комплект запасных частей, укладочных средств, тары и др.

Согласно СТБ1218-2000 для разработки и постановки продукции на производство используются основные термины:

Продукция – результат деятельности или процессов.

Единица продукции – отдельный экземпляр штучной продукции или определенное в установленном порядке количество нештучной или штучной продукции.

Образец продукции – единица конкретной продукции, используемая в качестве представителя этой продукции при исследовании, контроле или оценке.

Качество продукции – совокупность характеристик продукции, относящихся к ее способности удовлетворить установленные и предполагаемые потребности.

Технический уровень продукции – относительная характеристика качества продукции, основанная на сопоставлении значений показателей, характеризующих техническое совершенство оцениваемой продукции, с базовыми значениями соответствующих показателей.

Патентная чистота – независимость объекта техники от охраняемых прав третьих лиц на объекты промышленной собственности.

Техническое состояние – совокупность подверженных изменению свойств изделия, характеризующаяся в определенный момент времени фактическими значениями показателей качества, номенклатура которых установлена в технической документации.

Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и

условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Ресурс – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Испытания – экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата воздействия на него, при его функционировании, при моделировании объекта и (или) воздействий.

Эксперимент – система операций, воздействий и (или) наблюдений, направленных на получение информации об объекте при исследовательских испытаниях.

Гарантийный срок – интервал времени, в течение которого действуют гарантийные обязательства.

Срок годности – период, по истечении которого продукция считается непригодной для использования по назначению.

Изобретение – техническое решение, являющееся новым, имеющее правовую охрану, изобретательский уровень и промышленно применяемое.

Промышленный образец – новое художественное и художественно-конструкторское решение, определяющее внешний вид изделия, пригодное для промышленного производства, защищенное в установленном порядке, имеющее авторское свидетельство, и которому представлена правовая охрана.

Товарный знак – зарегистрированное в установленном порядке обозначение, помещаемое на товарах, упаковке или в документации, связанной с реализацией товара, и служащее для отличия однородных товаров разных изготовителей.

Ноу-хау – полностью или частично конфиденциальная информация, включая сведения технического, административного и финансового характера, которая имеет действительную или потенциальную коммерческую ценность в силу неизвестности ее третьим лицам.

Инновационная продукция – товар или услуга, являющиеся новыми или существенно улучшенными по своим характеристикам либо предполагаемому использованию, что включает значимые улучшения в технических спецификациях, компонентах и материалах, программных продуктах или других функциональных характеристиках.

Интеллектуальная собственность – совокупность исключительных прав на результаты творческой деятельности и приравненные

к ним, с точки зрения способов защиты, средства индивидуализации юридического лица, продукции, выполняемых работ и услуг.

Моделирование продукции – изучение объекта (продукции) путем экспериментального исследования физической и математической модели, воспроизводящей или имитирующей отдельные свойства объекта (продукции).

Модифицирование – вид разработки изделия на основе базового изделия с целью расширения или специализации сферы его применения.

Продукция производственно-технического назначения – продукция для использования в качестве средств промышленного и сельскохозяйственного производства.

Товары народного потребления – продукция, предназначенная для продажи населению с целью непосредственного использования ее для удовлетворения материальных и культурных потребностей.

Научно-техническая продукция – продукция, содержащая новые знания или решения, зафиксированная на любом информационном носителе, а также модели, макеты, образцы новых изделий, материалов и веществ.

Серийная продукция – продукция, изготавливаемая по одной и той же технической документации и выпускаемая в виде последовательного ряда единиц (партий) по нормативному документу, утвержденному в установленном порядке.

Единичная продукция – отдельное изделие или партия продукции установленного объема, изготовленные по единой документации и не предусмотренные к повторному изготовлению.

Продукция основного производства – продукция, предназначенная для поставки или непосредственной продажи стороннему потребителю.

Продукция вспомогательного производства – продукция, предназначенная только для собственных нужд изготовителя.

Экспериментальный образец – образец продукции, обладающий основными признаками намечаемой к разработке продукции, изготавливаемый в процессе проведения научно-исследовательской работы (НИР) с целью проверки предлагаемых решений и уточнения отдельных характеристик для использования их при разработке этой продукции.

Опытный образец – образец продукции, изготовленный по вновь разработанной рабочей документации для проверки путем ис-

пытаний или экспертной оценки для простейших изделий соответствия его заданным техническим требованиям с целью принятия решения о возможности постановки на производство и (или) использования по назначению.

Опытная партия – совокупность опытных образцов или определенный объем продукции, изготовленные за установленный период времени по вновь разработанной одной и той же документации для контроля соответствия продукции заданным требованиям и принятия решения о постановке ее на производство.

Контрольный образец – единица продукции или часть, или проба, утвержденные в установленном порядке, характеристики которых приняты за основу при изготовлении и контроле такой же продукции.

Жизненный цикл продукции – совокупность взаимосвязанных процессов последовательного изменения состояния продукции от формирования исходных требований к ней до утилизации.

Научно-исследовательская работа (по созданию продукции) – творческая деятельность, направленная на получение новых знаний и способов их применения.

Разработка аван проекта – вид работ, предшествующий разработке продукции, выполняемый будущим ее разработчиком по заданию заказчика или основного потребителя с целью технико-экономического обоснования целесообразности разработки продукции и путей ее создания, производства и эксплуатации.

Разработка продукции – процесс создания технической документации и образцов, необходимых для организации производства продукции.

Опытно-конструкторская работа ОКР – комплекс работ, выполняемых при создании или модернизации продукции: разработка конструкторской и технологической документации на опытные образцы (опытную партию), изготовление и испытания опытных образцов (опытной партии).

Опытно-технологическая работа ОТП – комплекс работ по созданию новых веществ, материалов и (или) технологических процессов и по изготовлению технической документации на них.

Патентные исследования (продукции) – исследование технического уровня и тенденций развития продукции, ее патентоспособности, патентной чистоты и конкурентоспособности.

Стендовые испытания – испытания объекта, проводимые на испытательном оборудовании.

Предварительные испытания – контрольные испытания опытных образцов и (или) опытных партий продукции, проводимые с целью определения возможности их предъявления на приемочные испытания.

Приемочные испытания – контрольные испытания опытных образцов, опытных партий продукции или изделий единичного производства, проводимые соответственно с целью решения вопроса о целесообразности постановки этой продукции на производство и (или) использования по назначению.

Сертификационные испытания – контрольные испытания продукции, проводимые с целью установления соответствия характеристик ее свойств национальными (или) международным нормативным документам.

Опытная апробация – формирование и изучение спроса потребителя на разработанную продукцию по результатам реализации опытной партии.

Постановка продукции на производство – совокупность мероприятий по организации производства вновь разработанной, модернизируемой или ранее освоенной другими изготовителями продукции.

Подготовка производства – составная часть постановки продукции на производство, содержащая мероприятия по подготовке и обеспечению технологического процесса ее изготовления или ремонта в заданном объеме выпуска.

Освоение производства – составная часть постановки продукции на производство, включающая отработку и проверку подготовленного технологического процесса и овладение практическими приемами изготовления продукции со стабильными значениями показателей и в заданном объеме выпуска.

Приемка продукции – проведение службой технического контроля и (или) представителем заказчика приемочного контроля продукции и оформление документов о ее пригодности к поставкам (или) использованию.

Ввод в эксплуатацию – событие, фиксирующее готовность изделия к использованию по назначению и документально оформленное в установленном порядке.

Сертификат соответствия – документ, выданный в соответствии с правилами системы сертификации, указывающий, что обеспечивается необходимая уверенность в том, что данная продукция, про-

цесс или услуга соответствуют конкретному стандарту или другому нормативному документу.

2.2. Стадии разработки новой продукции

Создание новой или усовершенствованной продукции в рамках научно-технической деятельности (проектов) предусматривает:

- 1) формирование целей, задач и методов реализации работ, т.е. составление технического задания (ТЗ);
- 2) разработку технической документации на изготовление и испытание опытных образцов новой или усовершенствованной продукции;
- 3) постановку продукции на производство или внедрение новых технологий.

Техническое задание является основным исходным документом для разработки продукции. Оно должно содержать технико-экономические требования к продукции, порядок сдачи и приемки результатов разработки. ТЗ на продукцию, использование которой способно причинить вред здоровью людей, окружающей среде должны содержать требования по безопасности.

Разработку технического задания осуществляет предприятие-разработчик и утверждает предприятие-заказчик. Действие технического задания заканчивается после утверждения акта приемочной комиссии. Если ТЗ содержит требования к подготовке и освоению производства или постановке изделий – действие его заканчивается после выполнения этих работ.

В ТЗ указывается необходимость изготовления при разработке продукции опытных образцов или опытных партий образцов. Необходимость проведения предварительных испытаний, если их проведение не оговорено в ТЗ, определяет разработчик. Предварительные испытания проводятся с целью определения возможности представления образцов продукции на приемочные испытания.

Стадия разработки		Этапы выполнения работ
Разработка проектной документации	Разработка технического предложения	Изучение и анализ ТЗ
		Подбор материалов
		Разработка КД технического предложения
		Рассмотрение и утверждение КД технического предложения с присвоением КД литеры «П»
Разработка	Разработка эскизного проекта	

	эскизного проекта	Изготовление и испытание и/или разработка и анализ материальных макетов (при необходимости) и (или) разработка, анализ электронных макетов (при необходимости)
		Рассмотрение и утверждение КД эскизного проекта с присвоением литеры «Э»
	Разработка технического проекта	Разработка технического проекта
		Изготовление и испытание материальных макетов (при необходимости) и/или разработка, анализ электронных макетов (при необходимости)
		Рассмотрение и утверждение КД технического проекта с присвоением литеры «Т»
Разработка рабочей КД	Разработка КД опытного образца (опытной партии) изделия	Разработка КД, предназначенной для изготовления и испытания опытного образца (опытной партии) изделия, без присвоения литеры
		Изготовление и предварительные испытания опытного образца (опытной партии) изделия
		Корректировка КД по результатам изготовления и предварительных испытаний опытного образца (опытной партии) изделия с присвоением КД литеры «О»
		Приемочные испытания опытного образца (опытной партии) изделия
		Корректировка КД по результатам приемочных испытаний опытного образца (опытной партии) изделия с присвоением КД литеры «О ₁ »
		При необходимости – повторное изготовление и испытание опытного образца (опытной партии) по документации с литерой «О ₁ » и корректировка КД с присвоением им литеры «О ₂ », «О ₃ »...«О _n »
	Разработка КД на изделие серийного (массового) производства	Изготовление и испытание установочной серии по документации с литерой «О ₁ » («О ₂ », «О ₃ »...«О _n »)
		Корректировка КД по результатам изготовления и испытания установочной серии, а также оснащения технологического процесса изготовления изделия, с присвоением КД литеры «А»
		Для изделия, работающего по заказу Министерства обороны, при необходимости, - изготовление и испытание головной (контрольной) серии по КД с литерой «А» и соответствующая корректировка КД с присвоением им литеры «Б»
	Разработка КД на изделие единичного производства	Разработка КД, предназначенной для изготовления и испытания изделия с присвоением им литеры «И»

Разработка технической документации.

Стадии разработки КД могут выполняться в виде разработки проектной и рабочей КД.

Разработка технической документации предусматривает разработку конструкторской и технологической документации.

Разработка конструкторской документации в общем случае в соответствии с ГОСТ 2.103 включает стадии:

- техническое предложение;
- эскизный проект;
- технический проект;
- разработка рабочей конструкторской документации;
- изготовление опытного образца (опытной партии) изделия, предназначенного для серийного (массового) или единичного производства;
- разработка технологической документации и технологическая подготовка производства.

Техническое предложение разрабатывают с целью выявления дополнительных или уточняющих требований к изделию (технических характеристик, показателей качества и др.), которые не могли быть указаны в ТЗ и это целесообразно сделать на основе предварительной конструкторской проработки и анализа возможных вариантов исполнения изделия. Перечень работ, выполняемых на стадии технического предложения определяется на основании предварительной конструкторской проработки требований ТЗ в соответствии с ГОСТ 2.118 и ГОСТ 2.125.

Эскизный проект разрабатывают с целью установления принципиальных (конструктивных, схемных и др.) решений изделия, дающих общее представление о принципе работы и (или) устройстве изделия, когда это целесообразно сделать до разработки технического проекта или рабочей документации.

На стадии разработки эскизного проекта рассматривают варианты изделия и (или) его составных частей. Эскизный проект может разрабатываться без рассмотрения на этой стадии различных вариантов. При разработке эскизного проекта выполняют работы, необходимые для обеспечения предъявляемых к изделию требований и позволяющие установить принципиальные решения. Перечень необходимых работ определяет разработчик в зависимости от характера и назначения изделия и согласовывает с заказчиком (ГОСТ 2.119).

Технический проект разрабатывают с целью выявления окончательных технических решений, дающих полное представление о конструкции изделия, когда это целесообразно сделать до разработки рабочей документации, если это предусмотрено ТЗ, результатами рассмотрения технического предложения или эскизного проекта. Примерный перечень работ приведён в ГОСТ 2.120.

Разработка рабочей конструкторской документации предусматривает создание комплекта документов, которые в отдельности или совокупности определяют состав и устройство изделия и содержат необходимые данные для его разработки, изготовления, испытания, приемки, эксплуатации и ремонта.

К конструкторским видам документов по ГОСТ 2.102 относятся и электронные модели детали, сборочной единицы, электронная структура изделия. Все графические документы могут быть выполнены в электронной форме, как электронные чертежи и (или) как электронные модели. Текстовые документы могут быть выполнены в электронной форме при этом их наименование должно соответствовать требованиям, установленным ГОСТ 2.102.

Конструкторские документы одного вида и наименования, независимо от формы выполнения, являются равноправными и взаимозаменяемыми. Комплектность документов, разрабатываемых на стадии разработки рабочей конструкторской документации, определяет разработчик в зависимости от вида изделия по ГОСТ 2.101 и в соответствии с требованиями ГОСТ 2.102. Требования к оформлению и изложению документов, разрабатываемых на стадии разработки рабочей конструкторской документации, изложены в соответствующих стандартах Единой системы конструкторской документации.

Разработанные документы рассматривают на научно-техническом совете разработчика с привлечением, при необходимости, заказчика и изготовителя. При отсутствии у разработчика такого совета документы рассматривают на совместном совещании представителей разработчика, заказчика и изготовителя. Результаты рассмотрения оформляются протоколом.

Экспериментальное подтверждение соответствия принимаемых решений при разработке конструкторской документации осуществляется путем разработки конструкторской документации, изготовления и испытания:

- макетов (моделей);
- опытных образцов (опытных партий).

Макет разрабатывают:

а) на стадии технического предложения с целью выявления и проверки вариантов основных конструктивных решений разрабатываемого изделия или его составных частей, анализа различных вариантов изделия, выявления дополнительных или уточненных требований к изделию;

б) на стадии эскизного проекта с целью проверки принципов работы изделия или его составных частей, условий размещения в отведенном пространстве, условий эргономичности использования и других свойств изделия или его составных частей;

в) на стадии технического проекта с целью проверки основных конструктивных решений разрабатываемого изделия или его составных частей по пространственно-кинематическому взаимодействию с другими изделиями и составных частей между собой, а также условий эргономичности;

г) на стадии рабочего проекта для предварительной проверки целесообразности изменения отдельных частей изготавливаемого изделия до внесения этих изменений в рабочие конструкторские документы опытного образца (опытной партии).

Макеты (модели) могут выполняться в материальной форме (материальный макет) или электронной форме (электронный макет).

Необходимость разработки макетов (моделей), их вид, условия и программы испытаний (анализа), а также необходимость разработки документации для изготовления и испытания макетов устанавливает разработчик. Требования к выполнению материальных макетов (моделей) - по ГОСТ 2.002, электронных макетов (моделей) - по ГОСТ 2.052.

Опытные образцы (опытные партии) разрабатывают на стадии разработки рабочей конструкторской документации.

Разработку конструкторской документации, предназначенной для изготовления и предварительного испытания опытного образца (опытной партии), осуществляют без присвоения литеры.

Конструкторским документам, откорректированным по результатам изготовления и предварительных испытаний опытного образца (опытной партии), присваивают литеру «О». Конструкторским документам, откорректированным по результатам приемочных испытаний опытного образца (опытной партии), присваивают литеру «О1». На стадии разработки рабочей конструкторской документации серийного

(массового) производства изготавливают и проводят испытания установочной серии по документам с литерой «О1».

Конструкторским документам откорректированным по результатам изготовления и испытания установочной серии с учетом оснащения технологического процесса присваивают литеру «А».

Для оценки соответствия результатов, полученных на этапах стадии разработки рабочей конструкторской документации, проводят контрольные испытания по категориям:

- предварительные испытания;
- приемочные испытания.

Предварительные испытания проводят с целью оценки соответствия опытного образца (опытной партии) требованиям ТЗ, а также для определения готовности их к приемочным испытаниям. Проведение предварительных испытаний организует разработчик опытного образца (опытной партии). Предварительные испытания проводят по программам и методикам испытаний, разработанным и утвержденным разработчиком опытного образца (опытной партии).

Приемочные испытания проводят с целью оценки соответствия всех, определенных в ТЗ, характеристик, проверки и подтверждения соответствия опытного образца (опытной партии) требованиям ТЗ в условиях максимально приближенных к условиям эксплуатации (применения, использования) продукции, а также для принятия решений о возможности постановки продукции на производство и реализации. Место проведения приемочных испытаний опытных образцов (опытных партий) определяет разработчик, а в случае, когда функции разработчика и изготовителя серийной продукции выполняют разные организации и не определены условия проведения испытаний в ТЗ, – разработчик совместно с изготовителем серийной продукции.

Приемочные испытания составных частей, разработанных по ТЗ головного исполнителя ОКР проводят с участием заинтересованных организаций с целью оценки соответствия требованиям ТЗ и определения возможности установки составных частей в опытные образцы, предназначенные для проведения предварительных испытаний. Проведение приемочных испытаний опытных образцов (опытных партий) составных частей, разрабатываемых по ТЗ головного исполнителя, с участием заинтересованных организаций организует головной исполнитель ОКР. Приемочные испытания проводят по программам и методикам испытаний, разрабатываемым и утверждаемым организацией, ответственной за их проведение.

Для проведения приемочных испытаний, как правило, назначается комиссия (далее - приемочная комиссия), которая осуществляет:

- проверку готовности мест проведения испытаний (лабораторий, испытательных центров, полигонов, мест непосредственной эксплуатации, разрабатываемой продукции, где предусматривается проводить испытания и т.п.) к обеспечению предъявляемых технических требований, требований безопасности, назначения ответственных специалистов по всем работам по подготовке и проведению испытаний, оценку характеристик продукции с установленной точностью измерений, а также правилами их регистрации;

- рассмотрение представленных разработчиком материалов, образовавшихся в процессе выполнения ОКР, опытные образцы, а если их изготовление не было предусмотрено, образцов единичной продукции, созданной в рамках выполнения ОКР;

- оценку результатов разработки продукции;

- составление акта приемочной комиссии по результатам приемочных испытаний.

В состав приемочной комиссии должны входить представители заказчика, разработчика и изготовителя, кроме того в состав приемочной комиссии могут включаться эксперты сторонних организаций, а также представители органов государственного надзора, в случае установления к продукции обязательных требований, касающихся их сферы деятельности.

Проведение приемочных испытаний может быть начато после проверки готовности мест проведения испытаний (лабораторий, испытательных центров и т.п.) к обеспечению технических требований, требований безопасности и после назначения ответственных специалистов по всем работам при подготовке и проведении испытаний, оценке характеристик продукции с установленной точностью измерений, а также регистрации их результатов. К началу проведения испытаний должны быть завершены мероприятия по их подготовке, предусматривающие:

- наличие и готовность на месте проведения испытаний средств материально-технического и метрологического обеспечения, гарантирующих создание условий и режимов испытаний, соответствующих указанным в программе испытаний;

- обучение и, при необходимости, аттестацию персонала, допускаемого к испытаниям;

- назначение комиссии или соответствующих организаций и их служб (если комиссия не назначается);
- своевременное представление опытного образца продукции с комплектом конструкторской, справочной и другой документации, предусмотренной программой испытаний.

По требованию заказчика или в соответствии с правилами оценки соответствия обязательным требованиям проведение испытаний может быть поручено специализированной испытательной организации (испытательному центру) или изготовителю, что должно быть оговорено в ТЗ или договоре (контракте) на выполнение ОКР.

Для обеспечения участия в испытаниях заинтересованных организаций (изготовитель, органы государственного надзора), они должны быть информированы о сроках проведения испытаний за один месяц до их начала. Органы государственного надзора, в сферу деятельности которых подпадают обязательные требования, касающиеся испытываемой продукции, обеспечивают участие своих представителей в приемочных испытаниях, либо сообщают о возможной даче заключения по их результатам. Если представитель органа государственного надзора не участвует в приемочной комиссии, или в случае отсутствия его заключения по результатам испытаний, считают, что орган государственного надзора согласен на приемку разработанной продукции или не заинтересован в ней.

В процессе испытаний ход и результаты испытаний документально фиксируют по форме и в сроки, предусмотренные в программе испытаний. В обоснованных случаях испытания могут быть прерваны или прекращены, что документально оформляется. Заданные и фактические данные, полученные при испытаниях, отражают в протоколе (протоколах) испытаний. В протоколах испытаний тексты, касающиеся проверок обязательных требований, следует оформлять в соответствии с требованиями правил оценки соответствия.

Испытания считают законченными, если их результаты оформлены актом приемочных испытаний опытного образца (опытной партии) продукции, подтверждающим выполнение программы испытаний и содержащим оценку результатов испытаний с конкретными точными формулировками, отражающими соответствие испытываемого опытного образца продукции требованиям ТЗ.

Разработчик представляет приемочной комиссии ТЗ на выполнение ОКР, проект технических условий (ТУ), конструкторские и (или) технологические документы, требующие совместное рассмот-

рение, отчет о патентных исследованиях, другие технические документы и материалы, требуемые по законодательству, подтверждающие соответствие разработанной продукции ТЗ и договору (контракту) и удостоверяющие ее технический уровень и конкурентоспособность. Приемочной комиссии, как правило, представляют также опытные образцы продукции, а если их изготовление не было предусмотрено - головной образец или единичную продукцию, изготовленную в рамках выполнения ОКР.

По результатам проведения приемочных испытаний и рассмотрения представленных материалов комиссия составляет акт, в котором указывает:

- соответствие образцов разработанной (изготовленной) продукции заданным в ТЗ требованиям, возможность ее производства (сдачи потребителю);
- результаты оценки технического уровня и конкурентоспособности продукции, в том числе в патентно-правовом аспекте;
- результаты оценки разработанной технической документации (включая проект ТУ);
- рекомендации о возможности дальнейшего использования опытных образцов продукции;
- рекомендации по изготовлению установочной серии и ее объему при выполнении работ по постановке продукции на производство;
- замечания и предложения по доработке продукции и документации (при необходимости);
- другие рекомендации, замечания и предложения приемочной комиссии.

Акт приемочной комиссии утверждает заказчик.

По окончании приемочных испытаний, решение о дальнейшем использовании опытного образца (опытной партии) принимается в соответствии с действующим законодательством и условиями, оговоренными в договоре (контракте) на выполнение ОКР.

Разработка технологической документации в процессе выполнения ОКР. Стадии разработки технологической документации определяются в зависимости от стадии разработки конструкторской документации и включают:

- предварительный проект;
- разработку документации:
 - а) опытного образца (опытной партии);
 - б) серийного (массового) производства.

На стадии «Предварительный проект» предусматривают разработку технологической документации, предназначенной для изготовления и испытания материальных макетов изделия и (или) его составных частей на основании конструкторской документации на них, разработанной на этапах «Эскизный проект» и «Технический проект».

На стадии разработки документации опытного образца (опытной партии) предусматривают разработку технологической документации для изготовления и испытания опытного образца (опытной партии) по конструкторской документации не имеющей литеры, без присвоения литеры.

Технологической документации, откорректированной по результатам изготовления и предварительных испытаний опытного образца (опытной партии) по конструкторской документации с литерой «О» присваивают литеру «О». Технологической документации, откорректированной по результатам приемочных испытаний опытного образца (опытной партии) и по результатам корректировки конструкторской документации с присвоением ей литеры «О1», технологической документации присваивают литеру «О1».

Технологической документации, предназначенной для изготовления и испытания изделий серийного (массового) производства присваивают литеру «А» на основании конструкторской документации, имеющей литеру «А».

Проведение работ по подготовке производства на стадии разработки технологической документации направлены на обеспечение готовности производства и изготовлению продукции в установленные сроки в заданных объемах, в соответствии с конструкторской документацией и требованиями действующего законодательства.

Подготовка производства на стадии разработки технической документации предусматривает:

- разработку технологической документации на процессы изготовления и испытание опытных образцов и ее корректировку по результатам испытаний;
- анализ и оценку принимаемых технических решений на соответствие технико-экономических показателей и технологичности;
- выявление потенциальных поставщиков составных частей, комплектующих изделий и материалов;
- оформление лицензионных соглашений с правообладателями на использование объектов промышленной интеллектуальной собственности;

- разработку технической документации на изготовление и наладку средств технологического оснащения, проведению их опробования и технологического процесса изготовления составных частей и изделия в целом;
- проведение обучения персонала, предусматриваемого к участию в изготовлении, испытаниях и контролю продукции;
- подтверждение готовности изготовителя к освоению производства.

2.3. Освоение производства

На этапе «Освоение производства» стадии «Постановка продукции на производство» предусматривают:

- изготовление, в соответствии с договором (контрактом) или иным документом, количества единиц продукции (установочной серии) в соответствии с требованиями конструкторской документации литеры «О1» по технологическому процессу организованному и оснащеному в соответствии с требованиями технологической документации литеры «О1»;
- проведение квалификационных испытаний образцов продукции установочной серии;
- отработку конструкции изделия на технологичность (при необходимости) и технологического процесса на соответствие требованиям по рациональному использованию топливно-энергетических ресурсов, материалоемкости, экологическим и эргономическим показателям;
- корректировку (при необходимости) конструкторской и технологической документации по результатам изготовления и испытания установочной серии с присвоением документации литеры «А»;
- определение необходимых мероприятий по дооснащению технологических процессов.

Объем установочной серии определяет изготовитель по согласованию с заказчиком.

Квалификационные испытания образцов продукции установочной серии проводят для подтверждения готовности производства к выпуску вновь создаваемой или усовершенствуемой продукции в заданных объемах, соответствующей требованиям конструкторской документации, оценки стабильности технологического процесса, обеспечивающего характеристики продукции, соответствующие требова-

ниям потребителей. Квалификационные испытания проводят по программе, разработанной изготовителем с участием разработчика и согласованной с заказчиком (при его наличии). В ней указывают:

- количество единиц продукции, подлежащих испытаниям и проверке исходя из сложности, стоимости, требований по надежности и другим свойственным для нее характеристикам (параметрам).

- все виды испытаний, соответствующие периодическим испытаниям, предусмотренным в технических условиях, а также испытания и проверки, включенные дополнительно для достижения целей квалификационных испытаний;

- место и условия проведения испытаний

Проведение квалификационных испытаний организывает и обеспечивает изготовитель продукции. Для проведения квалификационных испытаний создают комиссию, в состав которой включают представителя изготовителя, разработчика продукции, разработчиков и поставщиков комплектующих изделий и, при необходимости, органов государственного надзора и заинтересованных общественных организаций. Данные, полученные в результате квалификационных испытаний и проверок, отражают в протоколах с указанием фактических значений проверяемых характеристик (параметров), выявленных в результате осмотров, контроля, измерений и других действий, которые должны быть подписаны членами комиссии и лицами, участвующими в проведении соответствующего вида испытаний.

Результаты квалификационных испытаний считают положительными при условии, что образцы продукции установочной серии выдержали испытания по всем пунктам программы квалификационных испытаний, технологическая оснащенность производственных процессов и стабильность технологических процессов изготовления соответствуют требованиям выпускаемой продукции в заданных объемах, соответствующей конструкторской документации и пожеланиям потребителей по производственному процессу, организованному и оснащенному в соответствии с технологической документацией.

Положительные результаты квалификационных испытаний оформляют актом квалификационных испытаний установочной серии продукции, в котором указывают:

- соответствие продукции обязательным требованиям и конструкторской документации;

- результаты рассмотрения материалов, представленных комиссией;

- результаты выборочного контроля соблюдения технологической дисциплины и соответствия оснащённости технологического процесса технологической документации;

- оценку готовности производства к выпуску продукции для реализации и конструкторской и технологической документации и присвоения литеры «А»;

- рекомендации об установлении эталонов для промышленного производства (при необходимости), а также о возможности поставки продукции, изготовленной в процессе освоения производства с обязательным уведомлением потребителей об этом и реализации такой ее при их согласии и после приемо-сдаточных испытаний в установленном порядке.

Поставка продукции в период освоения производства может осуществляться при подтверждении изготовителем ее соответствия обязательным требованиям.

2.4. Технический уровень изделий

В современной экономике в условиях глобализации и углубления международного разделения труда проблема повышения качества машиностроительной продукции приобрела особое значение. Это обусловлено тем, что подобная продукция, в первую очередь, характеризуется своей комплексной составляющей, так как любое, даже довольно простое изделие, содержит в себе весьма большое число комплектующих деталей, которые чаще всего производят на различных смежных предприятиях. В связи с этим машиностроительный комплекс при производстве собственной продукции использует изделия либо сырьё предприятий различных отраслей и в конечном итоге выпускает собственный авторский продукт, потребительские свойства которого наследуют в себе качественные характеристики комплектующих, полученных по кооперации.

С учётом специфики машиностроительного производства качество продукции в этом случае является многоаспектным понятием и в зависимости от назначения и предъявляемых к изделиям требований, как правило, не может быть охарактеризовано одним обобщающим показателем. На практике чаще всего используется система показателей, на формирование и применение которой могут оказать влияние разнообразные факторы: многоплановость (сложность) свойств, образующих качество изделия; уровень новизны и сложности его конст-

рукции; своеобразие условий использования и восстановления свойств эксплуатируемых изделий и т. п.

В результате в широком смысле в содержание понятия о качестве машиностроительной продукции входят не только функциональные потребительские свойства (мощность машин, их быстродействие, производительность, материало- и энергоёмкость, степень автоматизации и т. д.), но и различные технологические свойства, а также характеристики таких эксплуатационных свойств, как надёжность, долговечность, безотказность, ремонтпригодность и др. Немалое значение имеют конструкторско-экономические особенности машин и механизмов, экологичность, безотказность эксплуатации, поэтому проблема качества машиностроительной продукции не является только экономико-технической, но имеет также выраженный социальный аспект.

Все эти факторы совместно определяют номенклатуру показателей качества, особенности их выбора и применения для конкретных условий разработки, изготовления и использования изделия по назначению. В связи с тем, что качество включает в себя совокупность свойств, обуславливающих способность продукции удовлетворять возникающую в обществе потребность, необходимо для обеспечения качества иметь определённую комплексную систему взаимосвязанных мероприятий организационного, технического, экономического, социального и правового характера, направленных на достижение поставленной цели повышения качества выпускаемой продукции.

Продукция машиностроения используется в основном как технологическое оборудование для различных отраслей народного хозяйства, позволяющее реализовывать новейшие технологии в производстве товаров и услуг и определяет научно-технический уровень страны. Можно сказать, что уровень качества машиностроительной продукции объединяет в себе все показатели свойств продукции, а оценка достигнутого уровня качества является основой для выработки необходимых управленческих решений в системе управления качеством на предприятии.

Под уровнем качества изделия понимаются относительные характеристики качества (или его обобщенная характеристика) по сравнению с совокупностью базовых показателей, в качестве которых используются показатели перспективных образцов, аналогов и стандартов. Под аналогом подразумевается образец серийного производства устройства, принцип действия которого, а также его функциональное

назначение, масштабы производства и условия применения те же, что и у проектируемого изделия.

Для определения научно-технического уровня выпускаемой продукции, ее соответствия требованиям потребителей, для решения производственных, экономических и социальных задач, а также для самого управления качеством необходимо осуществлять оценку уровня качества продукции. Последняя может проводиться различными методами в зависимости от ее сложности, назначения, количества показателей, характеризующих ее качество.

Оценка уровня качества продукции представляет собой совокупность операций, включающая в себя выбор номенклатуры показателей качества оцениваемой продукции, определение значений этих показателей и сопоставление их с базовыми. В общем виде оценка уровня качества может быть представлена следующими этапами, отраженными на рисунке 2.4.

Содержание этапов и объем работ на каждом из них существенным образом зависят от цели оценки качества продукции. Цель оценки обуславливают показатели качества, которые следует выбирать для рассмотрения (методы и точность определения их значения, выбор средств, а также определение вида обработки и формы представления результатов оценки). В соответствии с назначением промышленная продукция подразделяется на классы.

Первый класс (продукция, расходуемая при использовании) подразделяется на три группы:

- 1-я – сырье и топливно-природные ископаемые;
- 2-я – материалы и продукты;
- 3-я – расходные изделия.

Второй класс (продукция, расходующая свой ресурс) составляют две группы:

- 1-я – неремонтируемые изделия;
- 2-я – ремонтируемые изделия.



Рис. 2.4. Этапы оценки уровня качества продукции

Указанная классификация применяется для выбора номенклатуры единичных показателей выделенной группы продукции и определения области применения данной продукции, обоснования выбора конкретного изделия или нескольких изделий в качестве базовых образцов, а также для создания системы государственных стандартов на номенклатуру показателей качества продукции.

Номенклатуру показателей качества продукции устанавливают с учетом назначения и условий ее применения, требований потребителей (заказчиков), основных требований к показателям качества продукции и области их применения. При выборе номенклатуры показателей качества определяют группу однородной продукции и входящие в нее подгруппы и виды, номенклатуру групп показателей качества, номенклатуру показателей качества групп и подгрупп. Исходную номенклатуру показателей качества продукции устанавливают по рекомендациям таблицы 2.1.

Таблица 2.1

Применяемость основных показателей качества по классам и группам продукции

Показатель качества	1-й класс			2-й класс	
	1-я группа	2-я группа	3-я группа	1-я группа	2-я группа
Экономичность	+	+	+	+	+
Надёжность:					
безотказность	-	-	-	+	+
долговечность	-	-	-	+	+
ремонтпригодность	-	+	+	-	+
сохраняемость	+	+	+	+	+
Эргономичность	-	+	+	+	+
Эстетичность	-	+	+	+	+
Технологичность	+	+	+	+	+
Транспортабельность	+	+	+	+	+
Стандартизация и унификация	-	-	+	+	+
Патентно-правовой	-	+	+	+	+
Экологический	+	+	+	+	+
Безопасность	+	+	+	+	+

Примечание: «+» – означает применяемость показателей; «-» – неприменимость; вместо показателей ремонтпригодности для 2-й и 3-й групп продукции применяются показатели восстанавливаемости; по согласованию с заказчиком (потребителем) могут быть допущены отклонения от рекомендаций таблицы.

Необходимо отметить, что качество продукции определяется сравнением значений показателей качества одного и другого вида продукции. На основании сравнения можно сделать заключение о том, качество какой продукции будет выше (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Классификация методов определения значений показателей качества продукции

Из рисунка видно, что методы определения значений показателей качества продукции подразделяются на две группы: по способам получения информации и по источникам ее получения.

Первую группу составляют следующие методы определения значений показателей качества продукции.

Измерительный. Этот метод основан на информации, получаемой с обязательным использованием технических, предусмотренных конструкцией изделия, или дополнительных измерительных средств (амперметры, вольтметры, тахометры, спидометры и т. п.).

Регистрационный. Здесь используется информация, получаемая путем подсчета (регистрации) числа определенных событий, предметов и затрат (например, регистрация количества отказов изделия при испытаниях; затрат на создание и эксплуатацию изделия; количества частей сложного изделия, защищенных авторскими свидетельствами и патентами). С помощью этого метода можно определить показатели технологичности, экономичности, патентно-правовые, а также показатели стандартизации и унификации.

Органолептический. При применении данного метода используется информация, получаемая в результате анализа восприятия органов чувств (зрения, слуха, обоняния, осязания и вкуса). Точность и достоверность результатов зависит от способностей, квалификации и навыков лиц, выполняющих эту работу, а также от возможности использования специальных технических средств, повышающих разрешающие способности организма человека (микроскопов, микрофонов, луп). Этот метод наиболее широко применяется при оценке качества предметов потребления, в том числе продуктов питания (напитков, кондитерских, табачных и парфюмерных изделий), а также их эргономичности, экологичности, эстетичности.

Расчетный. Этот метод основан на использовании теоретических или эмпирических зависимостей показателей качества продукции от ее параметров. Его применяют в основном при проектировании продукции, когда она еще не может быть объектом экспериментального исследования (отсутствует опытный образец) и служит для определения производительности, мощности, прочности и т. д.

Рассмотренные методы могут применяться совместно на различных стадиях жизненного цикла продукции. Так, измерительный и регистрационный методы используются на стадиях разработки, производства и эксплуатации продукции производственно-технического

назначения и бытовой техники, органолептический и измерительный – на стадиях разработки и производства предметов потребления.

Во вторую группу методов определения значений показателей качества продукции входят традиционный, экспертный и социологический.

Традиционный. Здесь показатели качества определяются должностными лицами (работниками) специализированных экспериментальных лабораторий, полигонов, стендов и расчетных подразделений предприятий (конструкторских отделов, вычислительных центров, служб качества). Информация о показателях формируется в процессе испытаний продукции, условия проведения которых должны быть приближены к нормальным или форсированным эксплуатационным (например, в условиях полигонов автомобильных и тракторных предприятий, испытательных площадок и стендов энергетических турбин авиационных двигателей, телефонных аппаратов и т. д.).

Экспертный. Данный метод основывается на определении значений показателей качества на основе решения, принимаемого группой специалистов-экспертов. В такие группы объединяются специалисты различных направлений знаний и практических навыков в зависимости от вида оцениваемой продукции. Каждый из членов группы обладает правом решающего голоса. Этим методом пользуются в тех случаях, когда значения показателей качества продукции не могут быть определены более объективными методами.

Социологический. Метод основан на сборе и анализе информации о мнении фактических или возможных потребителей продукции. Сбор информации осуществляется в ходе устного опроса или с помощью распространения анкет, а также путем организации конференций, выставок, аукционов и т. п.

На заключительном этапе оценки качества продукции проводятся операции по определению уровня качества продукции. Как уже отмечалось, уровень качества продукции – это относительная характеристика ее качества, основанная на сравнении значений показателей качества оцениваемой продукции с базовыми значениями соответствующих показателей. Базовым значением показателя является оптимальный уровень, реально достижимый на некоторый период времени. За базовые могут приниматься значения показателей качества лучших отечественных и зарубежных образцов, по которым имеются достоверные данные о качестве, а также значения, достигнутые в не-

котором предыдущем периоде времени или найденные экспериментальным и теоретическим методами.

Для определения уровня качества существуют дифференциальный и комплексный методы оценки качества продукции.

Дифференциальный метод оценки качества продукции осуществляется сравнением показателей качества оцениваемого вида продукции с соответствующими базовыми показателями, т. е. показатель качества оцениваемой продукции P_i сопоставляется с показателем качества базового образца $P_{i\text{баз}}$, $P_2 - с P_{2\text{баз}}$, $P_n - с P_{n\text{баз}}$ (n – число сравниваемых показателей качества).

Для каждого из показателей относительные показатели качества оцениваемой продукции рассчитываются по следующим формулам:

$$Q_1 = \frac{P_i}{P_{i\text{баз}}}, \quad (2.1)$$

$$Q_1 = \frac{P_{i\text{баз}}}{P_i}, \quad (2.2)$$

где P_i – числовое значение i -го показателя качества оцениваемой продукции;

$P_{i\text{баз}}$ – числовое значение i -го показателя качества базового образца.

Формула (2.1) используется, когда увеличению абсолютного значения показателя качества соответствует улучшение качества продукции. По этой формуле вычисляют относительный показатель качества для мощности, срока службы, производительности, точности, коэффициента полезного действия.

По формуле (2.2) относительный показатель качества рассчитывается тогда, когда увеличение абсолютного значения показателя соответствует ухудшению качества продукции. По этой формуле определяют относительный показатель для себестоимости расхода материала, топлива, энергии, содержания вредных примесей, массы, трудоемкости, параметра потока отказов и других, так как в этих случаях улучшение качества определяется уменьшением абсолютного значения единичного показателя.

Встречаются случаи, когда трудно оценить уровень качества. В таких ситуациях все показатели целесообразно делить по значимости на две группы. В первую группу следует включить показатели, определяющие наиболее существенные свойства продукции, а в другую –

второстепенные. Если в первой группе все относительные показатели больше или равны единице, а во второй – большая часть показателей меньше единицы, то можно сказать, что уровень качества оцениваемой продукции не ниже базового образца.

В противном случае оценку уровня качества необходимо проводить другим методом (например, комплексным).

Комплексный метод оценки уровня качества предусматривает использование комплексного (обобщенного) показателя качества. Этот метод применяется в случаях, когда оказывается целесообразным выразить уровень качества только одним числом. Уровень качества по комплексному методу определяется отношением обобщенного показателя качества оцениваемой продукции $Q_{оц}$ к обобщенному показателю базового образца $Q_{баз}$, т.е.

$$Q_1 = \frac{Q_{оц}}{Q_{баз}}, \quad (2.3)$$

Сложность комплексной оценки заключается в объективном нахождении обобщенного показателя. Во всех случаях, когда имеется возможность выявления характера взаимосвязей между учитываемыми показателями и коэффициентами их связей с обобщающими показателями качества оцениваемой продукции, следует определить их функциональную зависимость. Вид зависимости может определяться любым из возможных методов, в том числе и экспертным. Обычно в этих случаях за обобщающий показатель принимается один из главных показателей назначения продукции. Таковыми могут быть, например, производитель машин, удельная себестоимость, ресурс и т. д.

Дифференциальный и комплексный методы оценки уровня качества продукции не всегда решают поставленные задачи. При оценке сложной продукции, имеющей широкую номенклатуру показателей качества, с помощью дифференциального метода практически невозможно сделать конкретный вывод, а использование только одного комплексного метода не позволяет объективно учесть все значимые свойства оцениваемой продукции.

В этих случаях для оценки уровня качества продукции применяют единичные и комплексные показатели качества, одновременно используя и комплексный и дифференциальный методы. Сущность и последовательность оценки комплексным методом заключается в следующем:

- единичные показатели качества объединяют в ряд групп, для которых определяют групповой комплексный показатель качества. Наиболее значимые единичные показатели можно не включать в группы, а рассматривать отдельно. Объединение показателей в группы должно производиться вне зависимости от цели оценки;

- найденные величины групповых комплексных и отдельно выделенных наиболее важных единичных показателей подвергают сравнению с соответствующими значениями базовых показателей, т. е. применяют принципы дифференциального метода.

С помощью измерений обычно (но не всегда) определяются единичные показатели качества. Патентно-правовые и экономические показатели, показатели однородности продукции, стандартизации и унификации получают расчетным путем. Таким же образом можно найти и комплексные показатели. Сравнение показателей качества, значения которых измерены или получены расчетным путем, может производиться по шкале интервалов либо по шкале отношений. При сравнении показателей качества как по шкале интервалов, так и по шкале отношений характер их динамики меняется. Например, при сравнении показателей качества по шкале отношений характер их динамики учитывается следующим образом: отношение числовых значений показателей качества составляет так, чтобы при повышении качества (по сравнению с исходным) оно было больше единицы, при снижении – меньше единицы (1, 2).

Относительная характеристика качества продукции, основанная на сравнении значений показателей качества оцениваемой (новой) продукции с базовыми значениями таких же показателей, определяет уровень качества продукции. Оценка технического уровня качества продукции заключается в установлении соответствия продукции мировому, региональному, национальному уровням качества или уровню отрасли. Соответствие оцениваемой продукции мировому уровню качества (или другим) устанавливается на основании сопоставления значений показателей технического совершенства продукции и базовых образцов.

Базовый образец – это образец продукции, представляющий передовые научно-технические достижения и выделяемый из группы аналогов оцениваемой продукции.

В результате оценки продукцию относят к одному из трех уровней:

- превосходит мировой уровень качества;

- соответствует мировому уровню качества;
- уступает мировому уровню качества.

Результаты оценки используют в процессе разработки новой или модернизированной продукции (при обосновании требований, закладываемых в техническое задание (ТЗ) и нормативную документацию (НД); принятии решения о постановке продукции на производство; обосновании целесообразности замены или снятия продукции с производства; при формировании предложений по экспорту и импорту). Следует отметить, что продукцию в любом случае относят к одной из трех градаций. При этом в случае, когда оцениваемая продукция превосходит хотя бы один (но не каждый базовый образец), она не уступает мировому уровню качества; если же она уступает хотя бы по одному (но не каждому базовому образцу), она не превосходит мировой уровень качества. В том и другом случае имеется неопределенность отнесения к одной из трех градаций.

Если в результате сопоставления оцениваемой продукции с каждым базовым образцом и (или) с совокупностью базовых образцов выявлена неопределенность отнесения продукции к градациям, то проводят следующие этапы сопоставления. По итогам проведения этих этапов оценки технического уровня продукции дают заключение о принадлежности продукции к одной из трех градаций. В случае, когда не существует аналогов оцениваемой продукции, она считается соответствующей мировому уровню качества, если данная продукция характеризуется принципиально новыми техническими решениями, которые защищены авторскими свидетельствами и (или) патентами. В заключение в зависимости от поставленных целей и полученных результатов подготавливают предложения для принятия решения по разработке, постановке на производство и совершенствовании продукции.

2.5. Патентные исследования

Проведение патентных исследований – это одна из обязательных подготовительных задач, когда речь идет о продвижении на рынок продукции. Такие исследования являются необходимыми при создании нового продукта (они помогают выявить так называемую «патентную чистоту» создаваемого или созданного объекта), но и при продвижении уже созданного продукта такие исследования могут по-

нять конкурентоспособность товара и помочь занять правильную нишу на рынке.

Использование в своем товаре чужих изобретений может привести к судебным тяжбам. А отсутствие у вас патента на свое изобретение – к копированию конкурентами ваших решений.

Патентные исследования могут проводиться в отношении таких объектов, как изобретения или полезные модели (для выявления возможности использования технического решения), промышленные образцы (для выявления возможности выпуска или продажи продукции определенного внешнего вида), товарные знаки (для определения возможности использовать конкретное обозначение в гражданском обороте).

Патентные исследования включают:

- разработку долгосрочных планов развития предприятия;
- проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ;
- создание новой продукции;
- освоение в производстве новой продукции, оборудования;
- стандартизацию и сертификацию выпускаемой продукции;
- организацию экспорта;
- работу по заключению лицензионных договоров.

Патентные исследования проводят как заказчики, так и изготовители или поставщики.

Использование ГОСТ и стандартов. Чтобы патентное исследование было достоверным, а его результаты могли использоваться официально, необходимо соблюдать существующие стандарты, регулирующие порядок и содержание самих исследований.

В Республике Беларусь действует Государственный стандарт Республики Беларусь СТБ 1180-99 «Патентные исследования. Содержание и порядок проведения».

Этапы патентного исследования

1. Определение задач патентного исследования и разработка задания. Задачи исследования определяются на основе анализа целей и характера работы, в том числе с учетом предыдущих патентных исследований, если такие проводились. В задании оговариваются технические моменты: наименование работы, шифр, сроки выполнения, ответственные лица и форма отчетности.

2. Утверждение регламента. Регламентом определяют где, что и когда будет проверяться. Для этого прописывается предмет поиска

(устройство полностью, его ключевые части, детали, и т.д.), страны поиска, глубину поиска и классификационные индексы.

3. Поиск и отбор информации. Формируется тот массив данных, который в дальнейшем будет основой для вывода о наличии патентной чистоты или ее отсутствии.

4. Обработка и систематизация данных, полученных в ходе проведения патентных исследований. Осуществляется анализ полученных данных и делается вывод в рамках поставленного задания.

5. Составление отчета. Это этап составления формализованного документа, отражающего основные сведения о результате патентных исследований – сведения об объекте исследования, информацию о выявленных источниках и их анализ, выводы и рекомендации.

Результаты патентных исследований в дальнейшем будут являться основой для принятия решений – о патентовании созданных технических решений или объектов дизайна, о необходимости получения лицензий для правомерности использования своих продуктов, о возможности выдачи лицензии иным лицам и так далее.

2.6. Внешняя форма изделий

В современном машиностроении трудоемкость механической обработки деталей доходит до 35...55 % от общей трудоемкости изготовления машин. Поэтому технологичность деталей, подвергающихся механической обработке, имеет важное значение, особенно в связи с механизацией и автоматизацией технологических процессов. Процессы резания следует использовать в случаях, когда другими процессами невозможно получить необходимые из конструктивных условий поверхности (отверстия, всевозможного рода пазы и полукрытые полости, резьбовые, шлицевые и, в ряде случаев, зубчатые, фасонные поверхности и др.), а также когда они более экономичны или без их применения невозможно обеспечить требуемую точность изготовления поверхностей.

Технологические требования, предъявляемые к конструкциям деталей и узлов машин, подвергающимся механической обработке, должны способствовать снижению трудоемкости обработки, а также повышению точности, стабильности геометрических размеров и получению высокого качества обрабатываемых поверхностей.

Технологичность конструкции детали, обрабатываемой резанием, зависит от технологичности формы детали, правильного назначе-

ния базовых поверхностей и размеров, оптимально заданной точности и шероховатости поверхности, рационального выбора заготовки и ее материала.

2.6.1. Элементы деталей и их поверхностей

При конструировании деталей необходимо ориентироваться на такой способ их оформления, при котором все их элементы имеют простую и правильную геометрическую форму, сочетаются технологически простыми сопряжениями, относятся к стандартизованным примитивам.

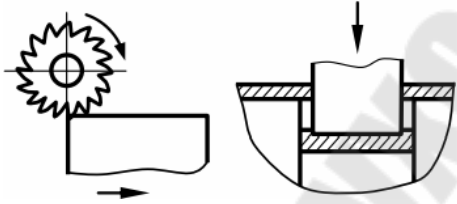
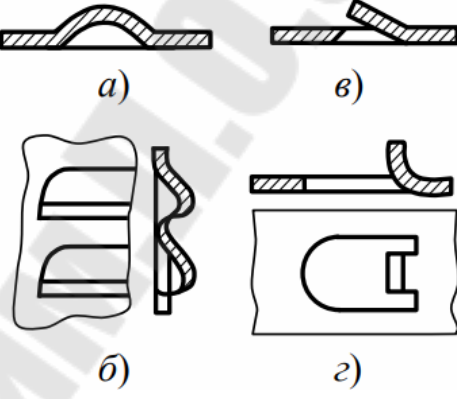
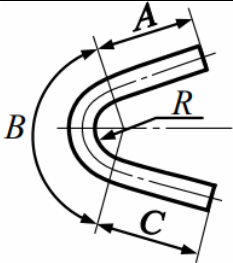

Конструкция детали должна соотноситься с планируемым способом получения заготовок, который соответствует выбранному способу изготовления, обеспечивающему высокие показатели производительности, экономичности и точности, состоять из таких формообразующих элементов, которые имеют общепризнанную конфигурацию и название (табл. 2.2).

Таблица 2.2

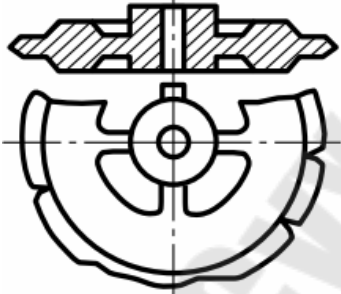
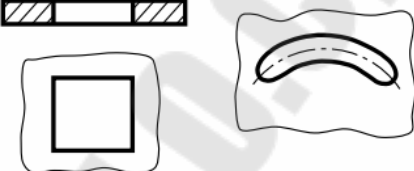
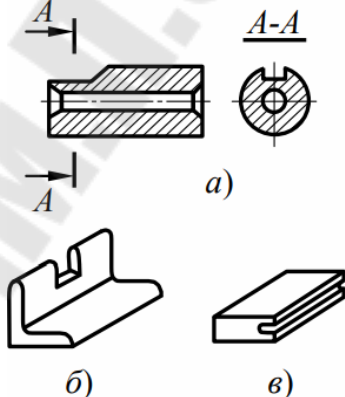

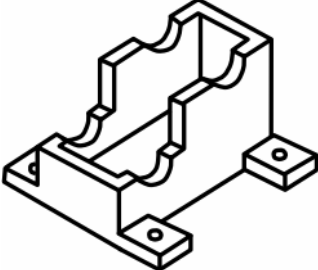
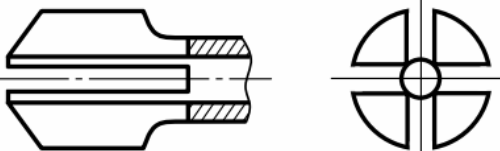
Элементы деталей и их поверхностей

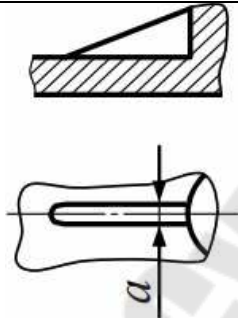
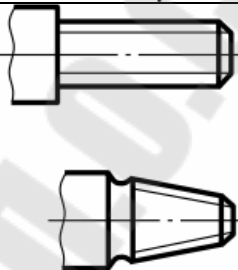
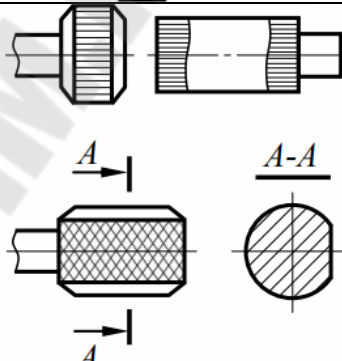
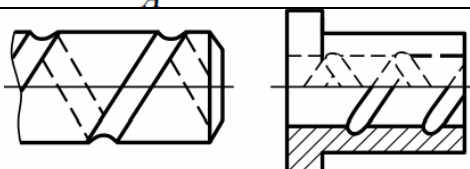
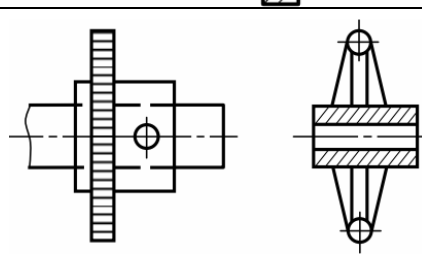

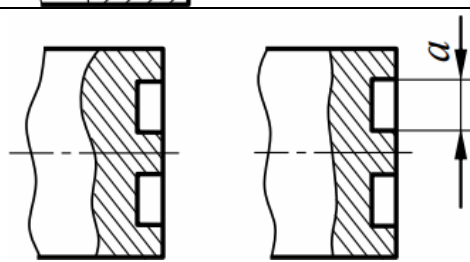
Название элемента	Описание элемента	Вид
Бобышка □	Выступающая часть материала, являющаяся местным утолщением стенки детали на ее наружной или внутренней поверхности и ограниченная замкнутой кривой	<p>The drawings show two cross-sectional views of a boss on the left and two top views on the right. The top views show a rounded rectangular shape with a central hole, one with a dashed centerline and one with a solid centerline.</p>
Буртик	Кольцевое утолщение цилиндрической детали, составляющие с ней одно целое	<p>The drawing shows a cross-section of a flange, which is a ring-shaped thickening of a cylindrical part, with a central hole and a dashed centerline.</p>

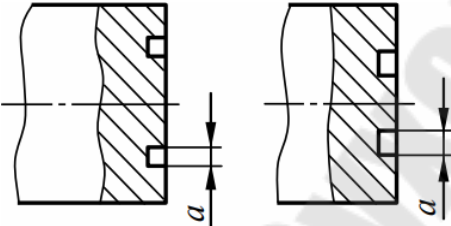
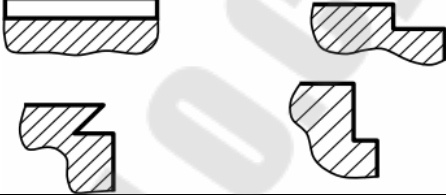
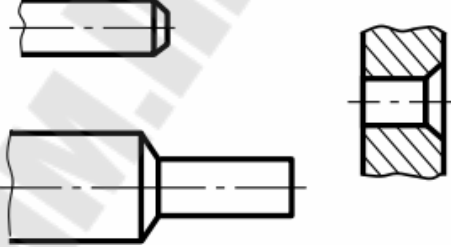
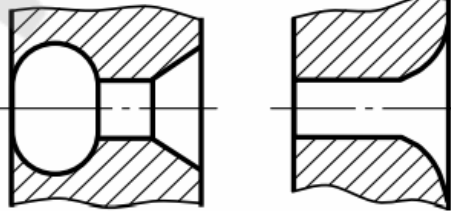
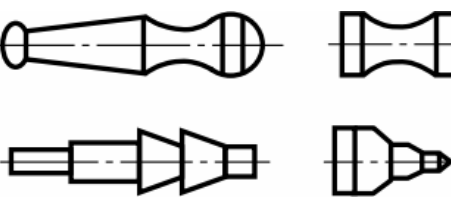
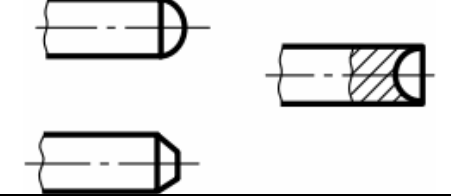
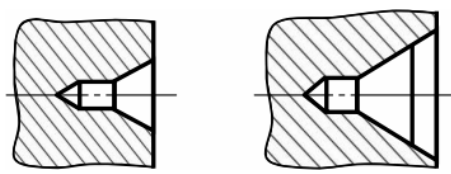
Впадина	Поверхности различной формы, утопленные по отношению к основной поверхности детали и ограниченные незамкнутым контуром	
Выточка	Кольцевые углубления различной формы, образованные на наружной или внутренней поверхности вращения с размером a , достаточно большим по сравнению с диаметром и линейными размерами детали	
Галтель	Криволинейная (радиусная) поверхность вращения, служащая переходом от одной поверхности вращения к другой	
Головка	Концевой элемент фигурной детали	
Грань	Поверхность, служащая для фиксирования детали, захватывания ее инструментом (ключом) и крепления	
Дно	Поверхность, ограничивающая глубину отверстия или гнезда	
Замок	Соединение листовых деталей загибанием кромок	
Запечник	Переходная поверхность вала между участками разного диаметра	



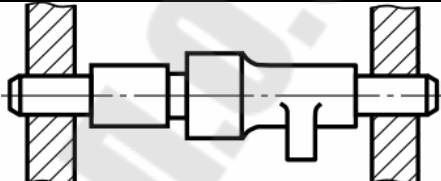
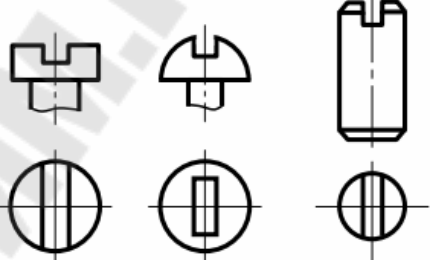

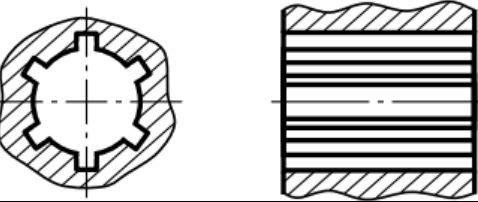
<p>Заусенец</p>	<p>Несрезанная стружка вязкого материала, образовавшаяся по краям обрабатываемой поверхности при работе резца, фрезы или при штамповке</p>	
<p>Изгиб местный</p>	<p>Местная деформация с образованием рельефа без прорезки материала (а); с прорезкой материала с одной стороны – жалюзи (б); с прорезкой материала с нескольких сторон и отгибкой – надрезка (в); с бортом по внутреннему или наружному контуру листовой детали - отбортовка (г)</p>	
<p>Изгиб угловой</p>	<p>Сопряжение двух прямолинейных участка <i>A</i> и <i>C</i> криволинейным участком <i>B</i></p>	
<p>Канавка</p>	<p>Различной формы углубления, образованные на какой-либо наружной или внутренней поверхности (размер <i>a</i> незначителен по сравнению с линейным размером детали)</p>	
<p>Кольцевой паз на торце</p>	<p>Кольцевая выемка (углубление) на торце детали с любой формой поперечного сечения и любой глубиной</p>	

Коническое отверстие	Внутренняя поверхность, образованная вращением прямой линии, расположенной под углом к оси вращения	
Коническая поверхность вращения	Поверхность, образованная вращением прямой линии, расположенной под углом к оси вращения	
Контур	Замкнутая кривая, определяющая геометрию детали или ее элемента	
Контур прямолинейный	Контур детали, образованный прямыми линиями (фаски и скругления кромок не учитывают)	
Криволинейная поверхность вращения	Поверхность, образованная вращением кривой линии вокруг оси вращения	
Лыска	Плоскость на цилиндрической поверхности детали, образованная срезанием ее части	
Направляющие поверхности	Поверхности детали, по которым перемещается сопрягаемая с ней деталь: плоские (а), призматические (б), типа «ласточкин хвост» (в), радиусные (г)	

Облой	Наплывы и излишки материала в местах разъема пресс-форм и штампов при литье в кокиль, прессовании пластмасс, горячей штамповке и т. д.	
Окно	Сквозное отверстие произвольной формы	
Паз	Углубления различной формы, длина которых, как правило, больше ширины: пазы, открытые с одной (а) или с двух противоположных сторон (б, в)	
Плоскость	Поверхность, образованная прямолинейным и параллельным перемещением прямой линии	
Плоскость разъема	Плоскость гладкая или ступенчатая, проходящая через вспомогательные базы детали	
Прорезь	Паз, проходящий через всю толщину детали	

Ребро	Выступающая поверхность, размера которой незначителен по сравнению с длиной детали; назначаемый, как правило, для увеличения жесткости детали	
Резьба	Поверхность, образованная при винтовом движении заданного плоского контура на боковой поверхности цилиндра или конуса	
Рифление	Совокупность узких острых бороздок, образующихся вдавливанием в деталь накатного инструмента	
Спиральная канавка	Углубления различной формы, расположенные по спирали	
Ступица	Цилиндрическая центральная часть детали (маховика, шкива, зубчатого колеса и т. д.) с отверстием для насадки на вал или ось	
Торец	Поверхность детали, перпендикулярная продольной оси	
Торцовая выточка	Кольцевые углубления различной формы на торцовой поверхности, размер которых a достаточно велик по сравнению с диаметром детали	

Торцовая канавка	Кольцевые углубления различной формы на какой-либо торцовой поверхности, размер которых a невелик по сравнению с диаметром детали	
Уступ	Плоскости относительно небольших размеров, пересекающиеся под некоторым углом	
Фаска	Фаска – поверхность, образованная скосом торцевой кромки материала, служащая переходом от одной наружной или внутренней поверхности к другой	
Фасонное отверстие	Внутренняя поверхность, образованная вращением ломаной линии относительно прямой оси	
Фасонная поверхность	Поверхность тела, образованная вращением ломаной или кривой линии относительно прямой оси	
Фасонный торец	Поверхность, образованная вращением кривой или ломаной линии относительно оси	
Центровое отверстие	Углубление из цилиндрических и конических поверхностей на торце детали для дальнейшей установки деталей в неподвижных и вращающихся центрах	

Центровое углубление	Коническое углубление, служащее для направления инструмента, обрабатывающего отверстие	
Цилиндрическая поверхность вращения	Поверхность, образованная вращением прямой линии параллельно оси вращения	
Шейка	Цилиндрический участок детали, помещаемой при сборке в опорную деталь	
Шлиц	Канавка в головке крепежных изделий	
Шлицевой вал	Вал с продольными канавками и выступами для передачи крутящего момента	
Шлицевое отверстие	Отверстие с продольными канавками и выступами для передачи крутящего момента	

2.6.2. Общие требования к технологичности форм деталей

Технологичность формы детали оценивают с учетом особенностей выбранного технологического метода обработки, конкретных условий и вида производства (массового, серийного, единичного), технологических возможностей и особенностей оборудования. С целью обеспечения возможности механической обработки производительными методами к деталям предъявляются следующие требования:

1. Надлежащая жесткость деталей и удобство их установки на станке для обработки. Для закрепления нежестких деталей требуются

более сложные и дорогие приспособления, а также значительные затраты времени на их установку на станке.

2. Расчленение труднообрабатываемых деталей сложной конфигурации на ряд простых по конфигурации деталей, соединяемых сваркой, запрессовкой и другими способами.

3. Перенос с отдельных трудно изготавливаемых конструктивных элементов детали их функций на сопряженные детали.

4. Одновременная обработка нескольких деталей.

5. Четкое отделение обрабатываемых поверхностей от необрабатываемых.

6. Разграничение поверхностей, обрабатываемых на различных операциях. Возможность обработки «напроход».

7. Хорошая доступность ко всем элементам детали для обработки и измерения.

8. Удобство врезания и выхода режущего инструмента.

9. Соответствие формы и размеров обрабатываемых поверхностей нормальному инструменту.

10. Равномерный и безударный съем материала на обрабатываемых поверхностях.

11. Упрощение формы механически обрабатываемых фасонных поверхностей.

12. Унификация деталей и их геометрических элементов.

Размеры поверхности детали должны соответствовать нормальному ряду длин и диаметров, так как это позволяет обрабатывать их стандартным инструментом. При обработке детали нестандартного размера требуется более дорогой нестандартный инструмент или выполнение дополнительных операций для получения заданных чертежом размера и формы поверхности. Конические переходы между ступенями вала и фаски следует назначать под обработку с учетом стандартных токарных проходных резцов с главным углом в плане, равным 30; 45; 60 и 90°.

Геометрические элементы детали должны быть унифицированы по форме и размерам. Это сокращает номенклатуру инструмента, повышает производительность обработки. Так, канавки одной и той же детали следует назначать одинаковой ширины и обрабатывать одним канавочным резцом с шириной режущей кромки, равной ширине канавки.

Поверхности должны соответствовать по форме стандартному инструменту. Например, глухие отверстия следует проектировать с

коническим дном, образуемым режущей кромкой сверла. Отверстия должны соответствовать по размерам стандартным сверлам. Не следует предусматривать сквозные отверстия с отношением длины к диаметру более 10, так как обработка таких отверстий требует применения специальных сверл. Удлиненные отверстия рекомендуются только в особых, технически обоснованных случаях. При сверлении удлиненными сверлами возможно смещение оси отверстия от заданного направления.

Форму шпоночного паза следует принимать в соответствии с размерами шпоночной или дисковой фрезы. Отдельные участки режущей кромки должны работать приблизительно в одинаковых условиях. Значительное различие в скорости резания на кромке приводит к неравномерному изнашиванию. Близко к оси вращения скорость резания мала, и инструмент не режет, а сминает материал заготовки. Наличие осевого отверстия существенно облегчает процесс резания.

Необходима безударная работа инструмента, которую обеспечивают плавные вход его в материал заготовки и выход. Это достигается, в частности, при наличии фасок и канавок для входа и выхода инструмента.

Безударную обработку торцов детали обеспечивает замена прямоугольного фланца круглым. Шлицевые отверстия втулок и муфт не должны иметь выточек в средней части.

Конструктивные элементы деталей не должны вызывать деформаций изгиба инструмента, особенно на его входе и выходе из заготовки, поэтому при протягивании, сверлении, зенкерования и развертывании поверхность, в которую входит инструмент, должна быть перпендикулярна направлению его движения. Это требование имеет особое значение для заготовок, обрабатываемых на агрегатных станках, автоматических линиях и станках с ЧПУ, при большом числе осевого инструмента с недостаточной изгибной жесткостью.

Целесообразно так проектировать детали, чтобы сила резания не изменялась в процессе обработки, так как изменения вызывают погрешности формы. Например, ширина фрезеруемых плоских участков детали должна быть постоянна. Изменение ширины фрезерования приводит к изменению сил резания.

Свободный доступ к поверхности упрощает процесс ее обработки, поэтому при обработке внутренних торцов доступ к ним облегчают увеличением диаметра отверстия для ввода инструмента. Следует также по возможности избегать обработки закрытых поверхностей.

Необходимо максимально упрощать фасонные поверхности, отделять их от остальных поверхностей детали канавками, выполнять поверхности симметричными. Это снижает стоимость обработки и позволяет использовать высокопроизводительные режимы резания. Значительно облегчают процесс обработки разграничивая поверхности, обрабатываемые различными методами или на различных операциях.

Упрощение конфигурации детали позволяет облегчить процесс ее обработки. Упрощать деталь можно разделением ее на несколько простых с последующим их соединением запрессовкой, сваркой и др.

Производительность обработки резко возрастает, если конструкция детали допускает многоместную обработку. Заготовки следует устанавливать без зазоров так, чтобы выход инструмента из одной заготовки был совмещен со входом в другую заготовку. Предпочтительнее конструкции, допускающие обработку напроход, например, следует заменять полузакрытые пазы сквозными.

Особое внимание нужно уделять технологичности корпусных деталей, для которых характерны высокая стоимость и трудоемкость обработки.

Отверстия в корпусных деталях целесообразно выполнять соосными.

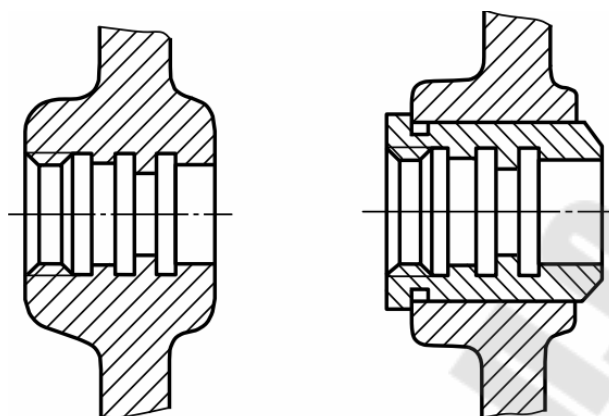
Отверстия, к которым предъявляют высокие требования по точности взаимного расположения, рационально обрабатывать, не раскрепляя заготовки. Конструкция деталей должна обеспечивать обработку отверстий за один рабочий ход, а их диаметры должны последовательно изменяться.

Для глухих отверстий, подвергаемых чистовой обработке, следует указать ее длину, так как по всей длине трудно достичь низкой шероховатости. При проектировании детали типа втулки необходимо избегать глубоких отверстий с двух сторон, так как это требует обработки детали за две установки.

Внутренние резьбы лучше выполнять сквозными. Глубина резьбы в глухих отверстиях должна быть согласована с размерами рабочей части метчика. Не рекомендуется назначать резьбы длиной более 1,6...3,0 диаметров, так как при этом нарушаются нормальные условия свинчиваемости деталей.

Изменение конструкции корпуса введением запрессованной втулки значительно облегчает его механическую обработку (рис. 2.6). В деталях, отличающихся по форме от тел вращения, следует избегать резьбовых отверстий большого диаметра, которые требуют обработки

резьбовым резцом. В особых случаях рекомендуется выполнять резьбовое отверстие во втулке с последующим закреплением в детали (корпусе).



Неправильно

Правильно

Рис. 2.6. Варианты конструкции корпусов:
а – цельный; б – с запрессованной втулкой

2.7. Выбор базовых поверхностей

Технологичность детали во многом определяет правильность назначения базовых поверхностей. Целесообразно совмещать конструктивные, технологические и метрологические базы. Несоблюдение этого вызывает необходимость введения технологических размеров, удлинение размерных цепей и ужесточение допусков на составляющие размеры. При невозможности совмещения конструктивных, технологических и метрологических баз необходимо связывать их наиболее рационально путем, учитывая производственно-технические требования.

Простановка размеров с учетом технологических требований обеспечивает:

- совмещение конструктивных, технологических и метрологических баз;
- автоматическое получение размеров детали при обработке на настроенном станке;
- применение наиболее простых приспособлений, режущего и измерительного инструмента;
- надежность и простоту обмера детали на станке при обработке и окончательном контроле;

- отсутствие необходимости в пересчете размеров при изготовлении и контроле деталей (взаимосвязь между обрабатываемыми и необрабатываемыми поверхностями);
- рациональную последовательность в обработке деталей;
- принцип наикратчайших размерных цепей.

Конструктивные формы деталей любого изделия машиностроения или его узлов должны назначаться с учетом их служебного назначения и определяются путем использования различных поверхностей или их сочетаний, которые ограничивают необходимое количество конструкционного материала. Анализ функционального назначения этих поверхностей позволяет их четко разделить на четыре вида.

С помощью поверхностей первого вида, называемых исполнительными, деталь выполняет свое служебное назначение. Поверхности второго вида определяют положение детали относительно других деталей, поэтому их называют основными базирующими поверхностями или основными базами детали. К третьему виду относятся поверхности детали, с помощью которых определяется положение всех прочих деталей, присоединяемых к данной детали. Эти поверхности определяют положение присоединяемых деталей относительно ее основных баз и, соответственно, относительно других деталей и механизмов изделия, поэтому их называют вспомогательными базами детали. Все остальные поверхности, которые не сопрягаются с поверхностями других деталей и завершают конструктивные формы анализируемой детали, называются свободными поверхностями.

Поверхности второго и третьего вида, которые совместно с поверхностями первого вида косвенно обеспечивают служебное назначение детали, также принято называть конструкторскими базами.

При разработке технологических процессов изготовления детали или сборки изделия в первую очередь возникает вопрос о выборе технологических и измерительных баз, т. е. поверхностей, которые определяют положение обрабатываемой детали на станке, в приспособлении и возможность контроля их пространственного расположения. Рациональный выбор технологических и измерительных баз, определяемый принципами единства и постоянства и непосредственной взаимосвязью с конструкторскими базами, как правило, способствует снижению трудоемкости, повышению точности и стабильности обработки и сборки, поскольку уменьшает число промежуточных звеньев и влияние их размерных параметров на точность получаемого размера.

Например, вал редуктора (рис. 2.7) предназначен для передачи вращательного движения и крутящего момента от левого зубчатого колеса к правому колесу (условно не показано), которые устанавливаются по цилиндрическим 1 и торцовым 2 поверхностям. Для предотвращения вращения зубчатых колес вокруг оси вала используются промежуточные детали – шпонки 3, которые размещаются в пазах 4. Сам вал монтируется в корпус с помощью подшипников, напрессовываемых на цилиндрические поверхности 5 до упора в торцовые поверхности 6.

Следуя изложенным принципам классификации, поверхности 5, 6, с помощью которых вал устанавливается на подшипники, будут являться его основными базами. Поверхности 1, 2; 4, необходимые для установки зубчатых колес, следует считать вспомогательными базами вала.

Для ограничения длины вала используются две плоские поверхности 7, а цилиндрическая поверхность 8 определяет форму средней части вала; в совокупности они придадут объему материала окончательные конструктивные формы вала и считаются свободными поверхностями. Наконеч, центровые отверстия 9 в торцах вала 7, которые служат для базирования вала в процессе изготовления, считаются технологическими базами, а при контроле биения базовых поверхностей вала и исполнительных поверхностей шестерни они выполняют функцию измерительных баз.

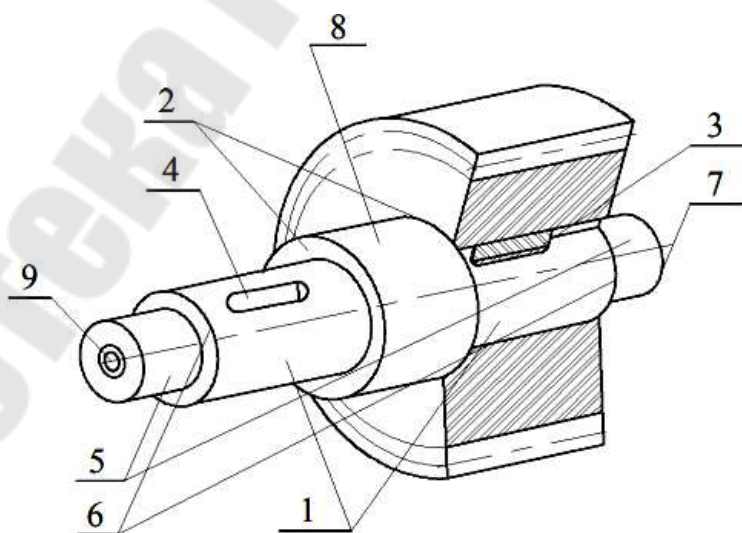


Рис. 2.7. Сборочная единица «Вал – шестерня»

РАЗДЕЛ 3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ

3.1. Допуски формы и расположения поверхностей

Точность формы характеризуется отклонением формы реальной поверхности (профиля) от формы номинальной поверхности (профиля), заданной чертежом, и определяется в соответствии с ГОСТ 2.308-2011. Допуски формы и расположения поверхностей в графических документах указывают с использованием условных обозначений (графических символов) или текстом в технических требованиях в случае отсутствия таких символов (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Графические символы (знаки) для указания допуска формы и расположения поверхностей

Группа допусков	Вид допуска	Знак
Допуск формы	Допуск прямолинейности	
	Допуск плоскостности	
	Допуск круглости	
	Допуск цилиндричности	
	Допуск профиля продольного сечения	
Допуск расположения	Допуск параллельности	
	Допуск перпендикулярности	
	Допуск наклона	
	Допуск соосности	
	Допуск симметричности	
	Позиционный допуск	
	Допуск пересечения осей	
Суммарные допуски формы и расположения	Допуск радиального биения	
	Допуск торцового биения	
	Допуск биения в заданном направлении	
	Допуск полного радиального биения	
	Допуск полного торцового биения	
	Допуск формы заданного профиля	
	Допуск формы заданной поверхности	

Следует учитывать, что суммарные допуски формы и расположения поверхностей, для которых не установлены отдельные графические знаки, обозначают знаками составных допусков в следующей последовательности: знак допуска расположения, знак допуска формы.

При указании допуска формы и расположения поверхностей в технических требованиях текст должен содержать:

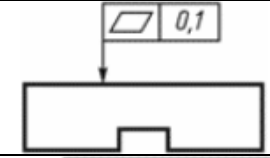

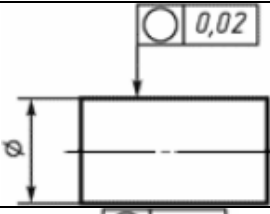
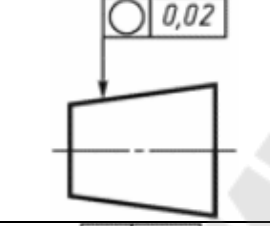

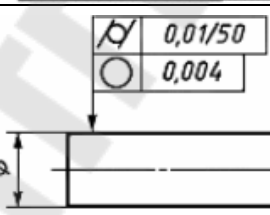
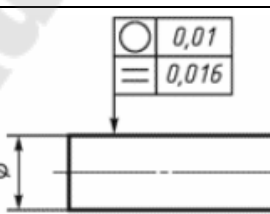
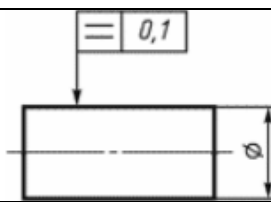
- вид допуска;
- указание поверхности или другого элемента, для которого задается допуск (для этого используют буквенное обозначение или конструктивное наименование, определяющее поверхность);
- числовое значение допуска в миллиметрах;
- указание баз, относительно которых задается допуск (для допусков расположения и суммарных допусков формы и расположения);
- указание о зависимых допусках формы или расположения (в соответствующих случаях).

Примеры указания условных обозначений допусков формы и расположения поверхностей приведены в таблице 3.2.

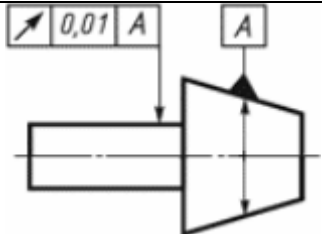
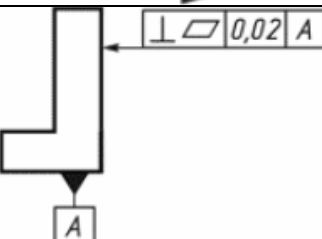
Таблица 3.2

Обозначение допусков формы и расположения поверхностей

Вид допуска	Указания допусков формы и расположения условным обозначением	Пояснение
Допуск прямолинейности		Допуск прямолинейности образующей конуса - 0,01 мм
		Допуск прямолинейности поверхности - 0,25 мм на всей длине и 0,1 мм - на длине 100 мм

Допуск плоскостности		Допуск плоскостности поверхности - 0,1 мм
		Допуск плоскостности поверхности - 0,1 мм на площади 100x100 мм
Допуск круглости		Допуск круглости вала - 0,02 мм
		Допуск круглости конуса - 0,02 мм
Допуск цилиндричности		Допуск цилиндричности вала - 0,04 мм
		Допуск цилиндричности вала - 0,01 мм на длине 50 мм. Допуск круглости вала - 0,004 мм
Допуск профиля продольного сечения		Допуск круглости вала - 0,01 мм. Допуск профиля продольного сечения вала - 0,016 мм
		Допуск профиля продольного сечения вала - 0,1 мм

Допуск параллельности		Допуск параллельности общей прилегающей плоскости поверхностей относительно поверхности - 0,1 мм
		Допуск перекоса осей отверстий - 0,2 мм. Допуск параллельности осей отверстий в общей плоскости - 0,1 мм. База - ось отверстия
Допуск перпендикулярности		Допуск перпендикулярности оси отверстия относительно оси отверстия - 0,06 мм
		Допуск перпендикулярности оси выступа в поперечном направлении - 0,2 мм, в продольном направлении - 0,1 мм. База - основание
Допуск наклона		Допуск наклона поверхности относительно поверхности - 0,08 мм
Допуск соосности		Допуск соосности отверстия относительно отверстия - 0,08 мм
Допуск симметричности		Допуск симметричности паза - 0,05 мм. База - плоскость симметрии поверхности

Допуск радиального биения		Допуск радиального биения вала относительно оси конуса - 0,01 мм
Суммарный допуск перпендикулярности и плоскостности		Суммарный допуск перпендикулярности и плоскостности поверхности относительно основания - 0,02 мм

Более полное описание приведенных, а также неуказанных допусков формы и расположения поверхностей приведен в ГОСТ 2.308-2011.

3.2. Обозначение шероховатости на чертеже

Обозначение шероховатости поверхностей и правила их нанесения на чертежах изделий независимо от метода образования, кроме поверхностей, шероховатость которых не обусловлена требованиями конструкции, установлены ГОСТ 2.309–73.

Структура обозначения шероховатости поверхности приведена на рис. 3.1. При применении знака без указания параметра и способа обработки его изображают без полки.

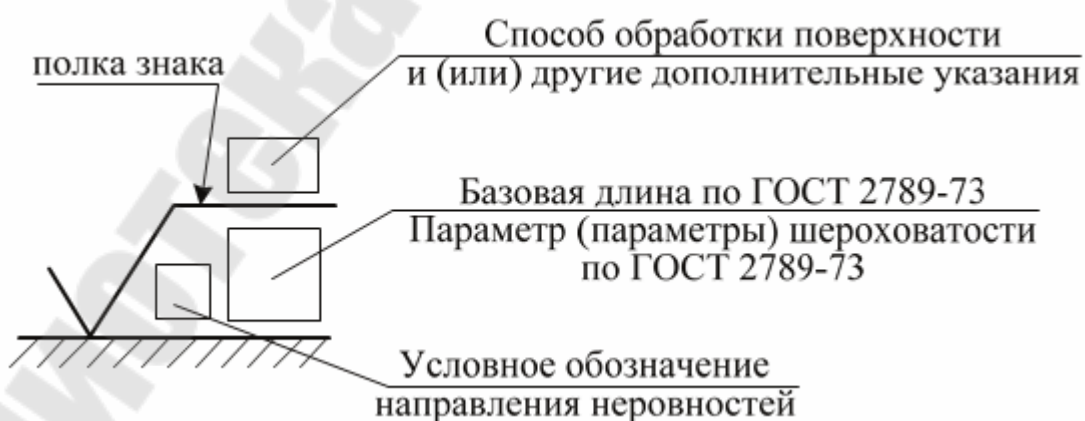


Рис. 3.1. Структура обозначения шероховатости поверхности на чертежах

Для обозначения шероховатости поверхностей деталей из металлов, пластмасс и других материалов применяют один из знаков, изображённых на рис. 3.2. Вершина угла направлена к поверхности, шероховатость которой нормируется. Высота h должна быть приблизительно равна применяемой на чертеже высоте цифр размерных чисел. Высота H равна $(1,5 \dots 5,0)h$. Толщина линий знаков должна быть приблизительно равна половине толщины сплошной основной линии, применяемой на чертеже.

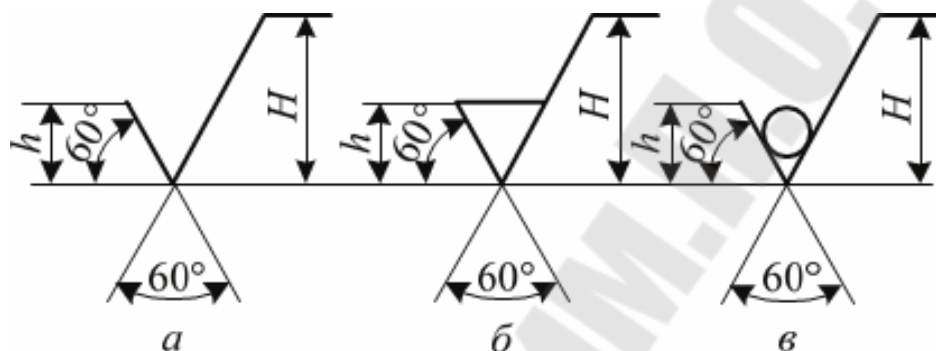


Рис. 3.2. Знаки для обозначения шероховатости на чертежах

Наиболее распространенным является знак (рис. 3.2, а), который показывает, что поверхность должна иметь определенную шероховатость, безразлично каким способом будет проведена обработка этой поверхности.

Знак (рис. 3.2, б) означает, что поверхность, на которую он указывает, должна быть обработана со снятием материала (точение, строгание, фрезерование, сверление, шлифование, хонингование).

Знак (рис. 3.2, в) имеет два значения. При одном значении он указывает, что поверхности детали, изготовляемой из материала определенного профиля и размера, не подлежат по данному чертежу дополнительной обработке. В этом случае они должны быть отмечены знаком без указания параметра шероховатости. Это могут быть не только грубые поверхности, но и шлифованные, полированные, имеющие специальные покрытия и т. п.

При другом значении данного знака состояние поверхности, на которую указывает знак своей вершиной, должна обрабатываться без удаления слоя материала (литьем, ковкой, штамповкой, прокатом, волочением, прессованием). В этом случае состояние поверхности, обозначенной знаком, должно соответствовать требованиям, установленным (или соответствующим) стандартом, или техническими условия-

ми, или другим документом, причем на этот документ должна быть приведена ссылка, например, в виде указания сортамента материала в графе 3 основной надписи чертежа по ГОСТ 2.104–68.

Значение параметра шероховатости по ГОСТ 2789–73 указывают в обозначении шероховатости после соответствующего символа, например: $Ra\ 0,4$; $R_{max}\ 6,3$; $Sm\ 0,63$; $t_{50}\ 70$; $S\ 0,032$; $Rz\ 50$.

Применительно к деталям машин и приборов наиболее распространенным способом нормирования требований к шероховатости поверхности является указание предельных значений параметров шероховатости.

При указании наибольшего значения параметра шероховатости в обозначении приводят параметр шероховатости без предельных отклонений, например: $Ra\ 0,4$; $Rz\ 50$.

При указании наименьшего значения параметра шероховатости после обозначения параметра следует указывать «min», например: $Ra\ 3,2\ min$; $Rz\ 50\ min$.

При указании диапазона значений параметра шероховатости поверхности в обозначении шероховатости приводят пределы значений параметра, размещая их в две строки, например: $Ra_{0,4}^{0,8}$; $Rz_{0,05}^{0,10}$; t_{50}^{70} и т.п.

В верхней строке приводят значение параметра, соответствующее более грубой шероховатости.

При указании номинального значения параметра шероховатости поверхности в обозначении приводят это значение с предельными отклонениями по ГОСТ 2789–73, например: $Ra\ 1^{+20\%}$; $Rz\ 100_{-10\%}$; $Sm\ 0,63^{+20\%}$, $t_{50}\ 70 \pm 40\%$ и т.п.

При указании двух и более параметров шероховатости поверхности в обозначении шероховатости значения параметров записывают сверху вниз в следующем порядке (рис. 3.3):

- параметр высоты неровностей профиля;
- параметр шага неровностей профиля;
- относительная опорная длина профиля.

The diagram shows a square root symbol (√) with a horizontal line extending from its top-right corner. Inside the symbol, the following parameters are listed from top to bottom: $Ra\ 0,1$; $0,8/Sm\ 0,063$; $0,040$; and $0,25/t_{50}\ 80 + 10\%$.

Рис. 3.3. Пример указания нескольких параметров шероховатости поверхности

При нормировании требований к шероховатости поверхности параметрами R_a , R_z , R_{max} базовую длину в обозначении шероховатости не приводят, если она соответствует указанной в приложении 1 ГОСТ 2789–73 (см. табл. 1.9) для выбранного значения параметра шероховатости. Базовая длина должна указываться в тех случаях, если для устанавливаемого значения параметра R_a , R_z или R_{max} в табл. 1.9 не задана базовая длина или если требуется нормировать значение параметра шероховатости на базовой длине, отличающейся от заданной в табл. 1.9. Числовые значения базовой длины l (мм) выбираются из ряда (0,01); (0,03); 0,08; 0,25; 0,80; 2,5; 8; (25). Значения, указанные в скобках, применяются в особых случаях.

В тех случаях, когда направление неровностей влияет на функциональные свойства поверхности, оно указывается с помощью условного обозначения (рис. 3.4). Высота знака условного обозначения направления неровностей должна быть приблизительно равна h . Толщина линий знака должна быть приблизительно равна половине толщины сплошной основной линии.



Рис. 3.4. Пример указания направления неровностей

Вид обработки поверхности указывают в обозначении шероховатости только в случаях, когда он является единственным, применимым для получения требуемого качества поверхности (рис. 3.5).

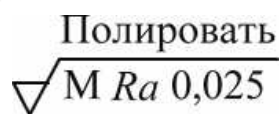


Рис. 3.5. Пример указания вида обработки

Допускается применять упрощенное обозначение шероховатости поверхностей с разъяснением его в технических требованиях по примеру, указанному на рис. 3.6. В упрощенном обозначении используют знак \surd и строчные буквы русского алфавита в алфавитном порядке, без повторений и, как правило, без пропусков.

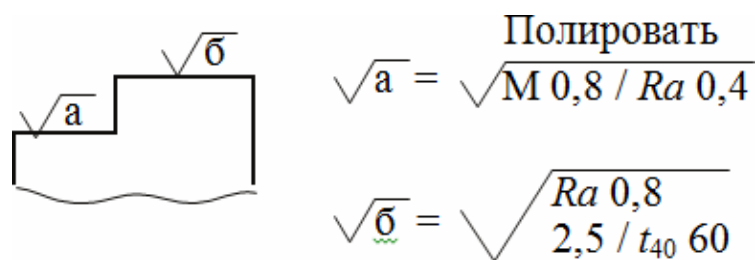


Рис. 3.6. Пример упрощённого обозначения шероховатости поверхности

Если направление измерения шероховатости должно отличаться от предусмотренного ГОСТ 2789–73, его указывают на чертеже по примеру, приведенному на рис. 3.7.

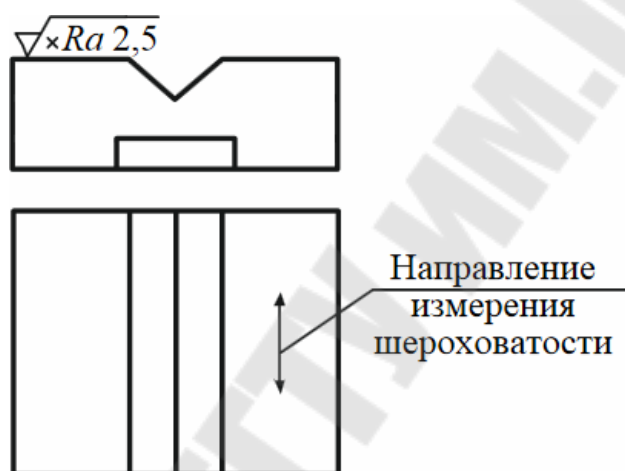


Рис. 3.7. Пример указания направления измерения шероховатости

Обозначение шероховатости поверхностей на изображении изделия располагают на линиях контура, выносных линиях (по возможности ближе к размерной линии) или на полках линий-выносок. Допускается при недостатке места располагать обозначение шероховатости на размерных линиях или на их продолжениях, на рамке допуска формы, а также разрывать выносную линию (рис.3.8).

На линии невидимого контура допускается наносить обозначение шероховатости только в случаях, когда от этой линии нанесен размер.

Обозначения шероховатости поверхности, в которых знак не имеет полки, располагают относительно основной надписи чертежа так, как показано на рис. 3.9, а, а знак с полкой располагают аналогично показанному на рис. 3.9, б, в.

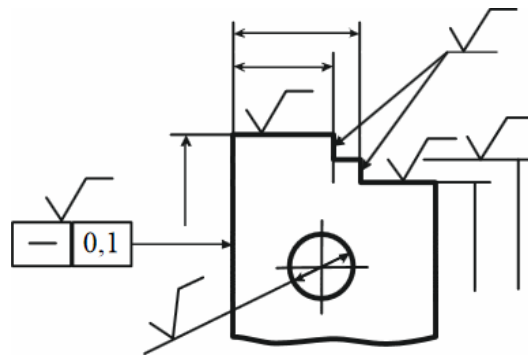


Рис. 3.8. Пример обозначения шероховатости поверхностей на размерных или выносных линиях

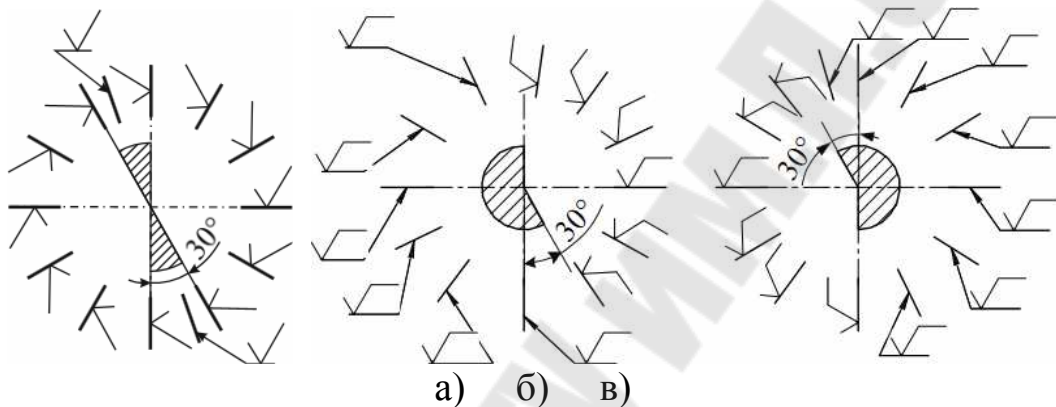


Рис. 3.9. Пример обозначения шероховатости поверхностей, в которых знак не имеет (а) и имеет (б, в) полки

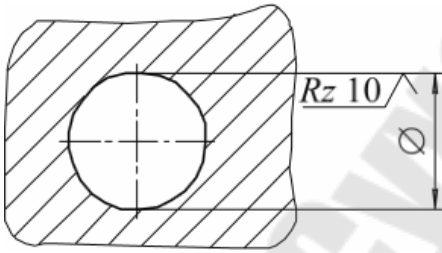
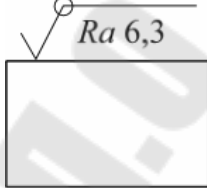
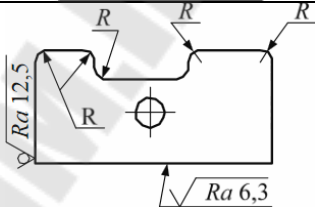
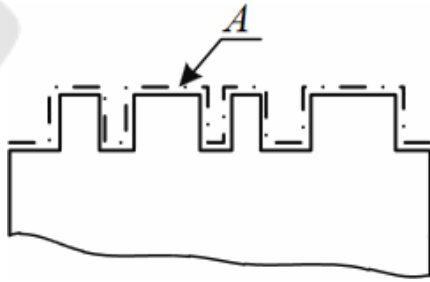
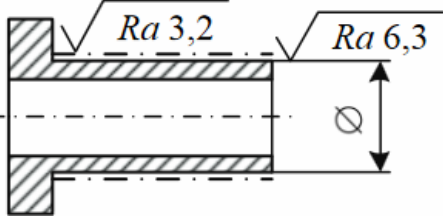
Примеры нанесения на чертежах обозначений шероховатости поверхностей приведены в табл. 3.3. Обозначение шероховатости поверхности по ГОСТ 2.309–73.

Таблица 3.3

Нанесение на чертежах обозначений шероховатости поверхностей по ГОСТ 2.309–73

Требование к шероховатости поверхности деталей	Примеры нанесения обозначений
Обозначение шероховатости, одинаковой для всех поверхностей изделия, помещают в правом верхнем углу чертежа и на изображении не наносят. Размеры и толщина линий знака в обозначении шероховатости, вынесенном в правый верхний угол чертежа, должны быть приблизительно в 1,5 раза больше, чем в обозначениях, вынесенных на изображении	

<p>Обозначение шероховатости, одинаковой для части поверхностей изделия, может быть помещено в правый верхний угол чертежа вместе с условным обозначением (✓). Это означает, что все поверхности, на которых на изображении не нанесены обозначения шероховатости, должны иметь шероховатость, указанную перед условным обозначением (✓)</p>	
<p>Если часть поверхностей не обрабатывается по данному чертежу, в правом верхнем углу чертежа перед обозначением (✓) помещают знак ✓</p>	
<p>Не допускается обозначение шероховатости или знак ✓ выносить в правый верхний угол чертежа при наличии в изделии поверхностей, шероховатость которых не нормируется. В основной надписи чертежа должна быть дана ссылка (в виде указания сортамента материала) на стандарт или технические условия, где установлены требования к шероховатости этих поверхностей</p>	
<p>При изображении детали с разрывом обозначение должно быть нанесено только на одной части изображения, по возможности ближе к месту указания размера</p>	
<p>Если шероховатость одной и той же поверхности различна на отдельных участках, то эти участки разграничивают сплошной тонкой линией с нанесением соответствующих размеров и обозначений шероховатости</p>	
<p>Через заштрихованную часть изображения линию границы между участками не проводят</p>	

<p>Обозначение шероховатости поверхностей повторяющихся элементов изделия (отверстий, валов, пазов и т. п.), количество которых в изделии указано в чертеже, а также обозначение шероховатости одной и той же поверхности следует наносить один раз, независимо от числа изображений. Обозначения шероховатости симметрично расположенных элементов симметричных изделий наносят один раз</p>	
<p>Если шероховатость поверхностей, образующих контур, должна быть одинаковой, обозначение шероховатости наносят один раз. Диаметр вспомогательного знака 4...5 мм</p>	
<p>В обозначении одинаковой шероховатости двух или более поверхностей, плавно переходящих одна в другую, знак не приводят</p>	
<p>Обозначение шероховатости, одинаковой на всех участках поверхностей сложного профиля, допускается приводить в технических требованиях чертежа со ссылкой на буквенное обозначение поверхности, например: «Шероховатость поверхности А – Ra 3,2».</p> <p>При этом буквенное обозначение поверхности наносят на полке линии-выноски, проведенной от штрихпунктирной утолщенной линии, которой обводят поверхность на расстоянии 0,8...1,0 мм от линии контура</p>	
<p>В технически обоснованных случаях допускается указывать одновременно шероховатость поверхности до нанесения покрытия и после него. При этом обозначение шероховатости поверхности до нанесения покрытия наносят по общим правилам, а обозначение шероховатости после нанесения покрытия на утолщенной штрихпунктирной линии. В некоторых случаях указывают шероховатость только после нанесения покрытия со ссылкой в технических требованиях чертежа, например: «Шероховатость поверхностей после покрытия»</p>	

3.3. Надежность изделий

Надёжность — это свойство изделия сохранять во времени работоспособное состояние, при котором оно способно нормально выполнять свои функции (с параметрами, установленными в технической документации) в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Актуальность проблемы надёжности обусловлена следующими основными причинами:

- ростом сложности технических систем;
- повышением «цены» отказа системы;
- увеличением степени автоматизации и стремлением к полному исключению человека-оператора;
- возрастающей сложностью условий эксплуатации техники.

Действующие на рабочие органы машин нагрузки и соответствующие им напряжения в деталях являются случайными величинами. Случайный характер имеют также размеры деталей, коэффициенты трения, зазоры и натяги в сопряжениях и др.

Случайными называют величины, которые принимают те или иные значения с некоторой вероятностью. Величины, значения которых не изменяются во времени и для определения которых имеются все необходимые данные, называются детерминированными.

Деление величин на случайные и детерминированные весьма условно. Например, размер детали можно считать детерминированной величиной, если не требуется определять его с высокой точностью, и случайной величиной, если к точности его определения предъявляют высокие требования.

Все изделия машиностроения в конце концов отказывают: ничто не является совершенно надёжным, ничто не работает вечно. Студент должен исходить из того, что любой узел откажет, и, следовательно, сконцентрировать свои усилия на уменьшении частоты его отказов до экономически и социально приемлемого уровня. Такой подход является более реалистичным и логичным, чем призывы: «отсутствие отклонений», «без риска», «безаварийный» и др.

Вероятностные понятия знакомы широким слоям общественности. Мы уже привыкли, например, к такому прогнозу погоды, как «возможна гроза с вероятностью 80%». Подобно этому возможность для человека промокнуть, если его зонт неисправен, может быть вы-

ражена вероятностным путём. Например, можно сказать, что ВБР $P(t)$ зонта, изготовленного год назад, равна 90%. Эта вероятность, разумеется, изменяется со временем. Безотказность зонта, как ожидается, со временем уменьшается: зонт, купленный два года назад, вероятно откажет быстрее, чем зонт, который прослужил только один год.

Безотказность не является единственным показателем, с помощью которого можно характеризовать, например, зонт. Если вещь не работает или сломана, ее можно починить. Когда зонт отдается в ремонт, его нельзя использовать, таким образом его работоспособность можно измерить с помощью коэффициента готовности K_g , т.е. того отрезка времени, в течение которого он готов к использованию и функционирует нормально. Ремонт требует денег, таким образом, всегда хочется знать ожидаемое число отказов в течение заданного времени эксплуатации.

Уровень надежности в значительной степени определяет развитие техники по основным направлениям: повышение безопасности страны, автоматизация производства, интенсификация рабочих процессов и транспорта, экономия материалов и энергии.

Современные технические средства очень разнообразны и состоят из большого количества взаимодействующих механизмов, аппаратов и приборов. Первые простейшие машины и механизмы состояли из десятков или сотен деталей, а, например, стратегический авиационный или ракетный комплекс состоит из десятков и сотен миллионов различных деталей. В таких сложных системах в случае отсутствия резервирования отказ всего одного ответственного элемента может привести к отказу или сбою в работе всего комплекса.

Низкий уровень надёжности оборудования может приводить к серьезным затратам на ремонт, длительному простоему оборудования, к авариям и т.п. Управлять надежностью — значит тем или иным способом влиять на значения показателей надежности технических систем на разных этапах их жизненного цикла. Три основных направления в управлении надежностью технических систем:

- 1) уменьшение интенсивностей отказов путем своевременного выявления (контроль) и устранения (ремонт) предпосылок к отказам перед решением важных задач;
- 2) повышение ремонтпригодности (диагностика, доступ и замена отказавших элементов) технических систем;
- 3) увеличение значений показателей надежности технических систем за счет ремонта, регулировок и настроек.

В настоящее время наблюдается быстрое и многократное усложнение машин, объединение их в крупные комплексы, уменьшение их металлоемкости и повышение силовой и электрической напряженности. Поэтому наука о надежности решает две основные задачи: разработка методов расчета и обеспечения надежности — прямая задача, разработка методов проектирования высоконадежных технических систем — обратная задача. Поиск оптимальных решений прямой задачи определяется уравнением $P(t) = \sup P(t) / C < C$, а обратной задачи уравнением $C = \inf C / P(t) > P_z$, где C_z и P_z — заданная стоимость ресурсов на повышение надежности и заданное значение надежности соответственно; C — стоимости многих переменных (ресурсов); $\sup P(t)$ и $\inf C$ — верхняя и нижняя границы функций $P(t)$ и C соответственно.

Отказы деталей и узлов в разных машинах и разных условиях могут иметь сильно отличающиеся последствия. Например, последствия выхода из строя оборудования, имеющегося на заводе в большом количестве, могут быть легко и без последствий устранены силами предприятия. А отказ специального станка, встроенного в автоматическую линию, вызовет значительные материальные убытки, связанные с простоем многих других станков и невыполнением заводом плана.

В данной работе сделана попытка осветить только основные методы оценки надежности технических устройств. Это потребовало обобщения результатов исследований в данной области целого ряда отечественных и зарубежных специалистов, причем был сделан упор не только на теоретическую разработку отдельных вопросов, но и на их практическую применимость.

Существуют аналитические зависимости между такими показателями, как ВБР, коэффициент готовности и ожидаемое число отказов. Точное описание отказов элементов и видов отказов занимает центральное место при выявлении неполадок в машине, так как они вызываются сочетаниями отказов этих элементов. Чаще всего проводится количественная оценка исходных событий, относящихся к элементам системы с двумя возможными состояниями, т.е. исправное состояние и состояние отказа. В машиностроении под элементами понимаются детали для узла и механизма, детали, механизмы и узлы для машины. Элементом технической системы называется ее часть, которая выполняет определенную операцию в общем процессе функционирования системы.

Событие, заключающееся в полной или частичной утрате работоспособного состояния, называют отказом.

Надежность изделий обуславливается их безотказностью, долговечностью и ремонтпригодностью.

Безотказность — свойство изделий непрерывно сохранять работоспособность в течение заданного времени (наработки).

Долговечность — свойство изделия длительно сохранять работоспособность до предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

Ремонтпригодность — приспособленность изделия к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов и восстановлению работоспособности.

Изделия подразделяют на невосстанавливаемые, которые не могут быть восстановлены потребителем и подлежат замене (подшипники качения, электрические лампочки, боеприпасы) и восстанавливаемые, которые могут быть восстановлены потребителем (станок, автомобиль, локомотив) или восстановлены отдельные элементы технически сложных систем.

Расчеты надежности проводятся с целью прогнозирования ожидаемого уровня надежности в течение всего жизненного цикла технических систем. При этом решаются организационно-технические вопросы, касающиеся:

- выбора оптимального варианта структуры системы и ее элементов;
- способов аппаратурного и временного резервирования;
- полноты, глубины и методов контроля работоспособности системы;
- количества запасных элементов (комплект ЗИП);
- периодичности профилактики.

Многочисленные цели расчетов разных систем и их элементов потребовали использования различных показателей надежности (технические количественные характеристики свойств надежности).

Показатели надежности изделий, их определения и области применения приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Показатели надёжности изделий

Обозначение	Показатель	Определение	Область применения
P_t	Вероятность безотказной работы (ВБР)	Вероятность того, что в пределах заданной наработки или времени работы отказ объекта не возникает	Основной показатель для оценки надёжной работы изделия
T_y	Гамма-процентный ресурс, ч	Наработка (срок службы) до отказа при заданной вероятности безотказной работы y , выраженной в процентах	Допустимая продолжительность работы изделия при заданных требованиях к его безотказности
T_m	Средний ресурс, ч	Гамма-процентный ресурс при $y = 50\%$	Для характеристики средней продолжительности работы изделия
W	Установленный ресурс (срок службы)	Установленная продолжительность работы изделия до ремонта или технического обслуживания T . T — календарный срок до капитального ремонта	Для назначения параметров системы ремонта и технического обслуживания
m_z	Гарантированный период безотказной работы	Наработка (время работы), в течение которой обеспечивается $K_n > 1$	Для характеристики безотказной и безопасной работы изделия
$(\theta = UT_0)$	Параметр потока отказов, 1/4	Среднее число отказов изделия в единицу времени, T_Q — наработка на отказ	Для изделий, допускающих отказы данного вида в период функционирования
X	Интенсивность отказов, 1/ч	Условная плотность вероятности	Наиболее удобная характеристика на-

		возникновения отказа изделия, которая определяется для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента времени отказ не возник	дежности простейших элементов для оценки надежности сложных систем
m_n	Ресурс(срок службы) до предельного состояния, ч	Установленная продолжительность работы изделия до предельного расстояния	Использование изделия по назначению в течение T_p допустимо и целесообразно
T_u	Коэффициент технического использования	Отношение времени выполнения изделием своих функций к сумме этого времени и времени его нахождения в ремонте или техническом обслуживании за весь период эксплуатации	Характеризует затраты времени, необходимые для восстановления утрачиваемой работоспособности
K	Коэффициент готовности	Вероятность того, что изделие окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение изделия по назначению не предусматривается	Оценивает безотказную работу изделия в периоды его функционирования с учетом возможности устранения некоторых отказов (между ремонтами и плановым техническим обслуживанием)
k	Коэффициент оперативной готовности	Вероятность того, что восстанавливаемое изделие окажется работо-	Используется как показатель технической эффективности функциони-

		способным в произвольный момент времени и будет работать безотказно в течение заданного интервала времени	рования изделия при выполнении заданной функции
C	Интенсивность восстановления	Условная плотность вероятности восстановления работоспособности изделия, определенная для рассматриваемого момента времени, при условии, что до этого момента восстановление не завершено	Используется при количественной оценке коэффициентов готовности и оперативной готовности изделия
V_{max}	Предельно допустимое значение выходного параметра X	Граница области работоспособности, при выходе за пределы которой происходит отказ изделия	Для фиксации параметрических отказов

Экспериментальные методы определения показателей надёжности основаны на испытаниях, которые в зависимости от поставленных целей подразделяются на: определительные, контрольные и исследовательские. По уровням проведения испытания бывают государственные, межведомственные и ведомственные. Большое значение в оценке качества продукции имеют данные, получаемые в процессе эксплуатации или же при проведении испытаний. Это обусловило необходимость создания единой системы промышленных испытаний (ЕСПИ). Эта система включает:

1. комплекс нормативной технической документации на:
 - 1.1 Методы и средства промышленных испытаний;
 - 1.2 Методы сбора, кодирования и обработки информации по результатам испытаний;
 - 1.3 Организационные основы оценки контроля обеспечения качества продукции.

2. систему отраслевых и межотраслевых испытательных центров.

В ЕСПИ ведущее место принадлежит испытаниям на надежность. Они предусматривают:

1. Определение уровня надежности и соответствия нормам надежности;

2. Определение допустимых и оптимальных условий и режимов эксплуатации;

3. Отработку системы технического обслуживания во время эксплуатации;

4. Исследование методов повышения надежности за счет улучшения конструкции, качества изготовления, упаковки, транспортировки и хранения.

Каждое готовое изделие проходит перед поставкой к потребителю приём-сдаточное испытание. Для оценки стабильности технологических процессов проводятся периодические испытания. При внесении изменений в конструкцию, материал, технологию изготовления проводятся типовые испытания.

Все выше описанные испытания относятся к категории контрольных.

Испытания, проводимые при подготовке к аттестации качества или же для изучения допустимых границ параметров, относятся к категории исследовательских. В зависимости от стадии разработки или производства проводятся:

1. Испытания опытных образцов новых конструкций;

2. Испытания образцов установочной серии, изготовленных по серийной технологии;

3. Испытания серийных или массовых изделий;

4. Испытания модернизированных изделий (отличающихся по конструкции или материалу);

5. Испытания отремонтированных изделий.

В зависимости от цели испытания подразделяются на:

- Определительные
- Контрольные
- Исследовательские

Определительные испытания позволяют определить закон распределения времени безотказной работы, установить ресурс и т.д.

В зависимости от сроков проведения испытаний делятся на:

- Ускоренные

- Обычные

В зависимости от вида разрушения, воспроизводимого при испытании:

- Изнашивание
- Усталость
- Коррозия
- Старение

• Испытания, при которых воспроизводятся комплексные разрушения. Данная группа относится к ресурсным испытаниям (испытаниям по определению показателей долговечности).

В зависимости от места проведения:

- Стендовые
- Полигонные
- Эксплуатационные

В зависимости от объёма используемой информации испытания подразделяются на:

- Прямые
- Испытания по сокращённой программе

При прямых испытаниях для оценки надежности используют информацию, полученную в процессе конкретных испытаний, а при испытании по сокращенной программе используют не только результаты испытаний, но и дополнительную информацию об изделии.

Проблема организации любого вида испытаний на надежность включает 3 аспекта:

1. Технический;
2. Математический;
3. Экономический.

Технический аспект – предусматривает анализ свойств и параметров изделий, подлежащих испытанию, выбор режимов испытаний, а также выбор контрольной и измерительной аппаратуры.

Математический – включает расчет числа изделий, длительности испытаний, оценку показателей надежности по результатам испытаний (определяющие испытания) либо правило принятия решения о соответствии надежности требуемому уровню, методы оценки результатов ускоренных испытаний.

Экономический – требует анализа вопросов, связанных со стоимостью испытаний, с выбором плана испытаний с экономической точки зрения.

3.4. Воздействие внешней среды на изделия

Качество продукции (изделия) закладывается на стадии разработки, обеспечивается в процессе производства и поддерживается на стадии эксплуатации. Разрабатывая продукцию (изделие), необходимо учитывать условия эксплуатации, хранения и транспортирования, характеризующиеся воздействием внешних и внутренних факторов.

Но, прежде чем приступить к изучению воздействия различных факторов на изделия, необходимо владеть терминологией.

Внешние условия – физические, химические или биологические условия, являющиеся внешними для продукта (изделия), которым он подвергается в определённое время. Примечание: как правило, внешние условия – это внешние природные условия, а также внешние условия, созданные самим продуктом или внешними источниками.

Внешнее воздействие – воздействие воды, масла, строительных материалов, веществ, вызывающих коррозию или загрязнение, механические воздействия снега, ветра, а также других опасных факторов окружающей среды. Примечание: к внешним воздействиям могут относиться физические, химические или биологические воздействия, которые либо в отдельности, либо в комбинации с другими воздействиями формируют внешние условия (например, нагрев, вибрация).

Внешний параметр – одно или несколько физических, химических или биологических свойств, характеризующих внешнее воздействие (например, температура, ускорение). Пример: внешнее воздействие "вибрация" характеризуется следующими параметрами: тип вибрации (синусоидальная, случайная), ускорение и частота.

Степень интенсивности внешнего параметра – значение каждой величины, характеризующей внешний параметр. Пример: степень интенсивности синусоидальной вибрации определяется значениями ускорения (м/с) и частоты (Гц).

Область применения продукта – условие или среда, в которой продукт функционирует. Пример: офисные помещения, сталелитейный цех, наземный транспорт. Область применения не относится к классу продуктов (например, компьютеры).

Группа внешних параметров и степени их интенсивности – множество внешних условий, характерных для конкретного применения (цели).

атмосферное давление: Абсолютное давление околоземной атмосферы.

Атмосферные осадки – выпадающие или конденсированные осадки.

Атмосферные выпадающие осадки – вода в жидком и твёрдом состоянии, выпадающая из облаков.

Атмосферные конденсированные осадки – вода в жидком и твёрдом состоянии, образующаяся на земной поверхности и на предметах, находящихся вблизи неё, в результате конденсации водяного пара, находящегося в воздухе.

Аэродинамический нагрев – нагревание обтекаемой газом поверхности тела, движущегося в газообразной среде с большой скоростью при наличии конвективного, а при гиперзвуковых скоростях и радиационного теплообмена с газовой средой в пограничном или ударном слое.

Аэродинамический удар – механическое воздействие ударной волны, образующейся при движении летательного аппарата в атмосфере в момент достижения им сверхзвуковой скорости.

Бактерия – микроорганизм, обладающий клеточной оболочкой, но не имеющий клеточного ядра, размножающийся простым делением и способствующий разрушению изделий.

Биологический ВВФ – организмы или их сообщества, оказывающие внешние воздействия и вызывающие нарушение исправного и работоспособного состояния изделия.

Ветер – поток воздуха, движущийся со скоростью свыше 0,6...1 м/с.

Внешний воздействующий фактор (ВВФ) – внешний фактор, который может оказывать воздействие или влияние на характеристики системы.

Воздействие землетрясения – сейсмическое воздействие, вызванное естественными причинами.

Гидравлический удар – резкое повышение или понижение давления движущейся жидкости при внезапном уменьшении или увеличении скорости потока.

Динамическая пыль (динамический песок) – аэрозоль с твёрдой дисперсной фазой (пыль или песок), находящийся в динамическом состоянии.

Динамическое давление (скоростной напор) – механическое давление, интенсивность, точка приложения и направление которого изменяются во времени настолько быстро, что учитываются силы инерции.

Дифферент – наклон изделия, при котором его вертикальная ось отклонена в продольной плоскости симметрии от вертикали относительно земной поверхности.

Интегральное солнечное излучение – электромагнитное излучение, равное селективно фильтрованному спектру частот.

Испытательная среда – специальная среда, воздействующая на изделие при проведении контрольных испытаний в процессе его изготовления и приёмки.

Качка – колебание изделия, при котором его вертикальная ось отклоняется от вертикали относительно земной поверхности.

Коррозионно-активный агент морской воды – вещество, находящееся в морской воде и приводящее к ускорению процессов разрушения изделия за счёт коррозии. К таким веществам относятся, например, хлориды, сульфаты, карбонаты щелочных и щёлочноземельных металлов и др.

Коррозионно-активный агент окружающей среды – вещество, находящееся в атмосфере и приводящее к ускорению процессов разрушения изделия за счёт коррозии. К таким веществам относятся, например, сернистый газ, хлориды, нитраты, сульфаты и т.д.

Коррозионно-активный агент почвенно-грунтовой среды – вещество, находящееся в почве и грунте и приводящее к ускорению процессов разрушения изделия за счёт коррозии. К таким веществам относятся, например, хлориды, нитриды, сульфаты, карбонаты, гумус, продукты метаболизма и др.

Крен – положение изделия, при котором его вертикальная ось отклонена в поперечной плоскости симметрии от вертикали к земной поверхности.

Лазерное излучение – электромагнитное хроматическое излучение видимого, инфракрасного и ультрафиолетового диапазона, основанное на вынужденной эмиссии излучения атомов и молекул.

Механический удар – кратковременное механическое воздействие твёрдых тел при их столкновении и сопутствующие этому процессу явления.

Механическое давление – давление, характеризующееся интенсивностью силы, с которой одно тело или среда действует на поверхность другого тела или среды.

Номинальное значение ВВФ – нормируемое изменяющееся или неизменное верхнее и нижнее значения ВВФ, в пределах которых

обеспечивается заданное работоспособное состояние конкретных видов изделий.

Номинальные условия эксплуатации – совокупность номинальных значений ВВФ.

Нормальное значение ВВФ – значение ВВФ, статистически обработанное и усреднённое на основе наблюдений для определённой области эксплуатации изделия или группы изделий.

Плесневый гриб – микроорганизм, развивающийся на металлах, оптических стёклах и других материалах в виде бархатистого налёта, выделяющий органические кислоты, способствующие разрушению изделий.

Прочность изделия к ВВФ – свойство изделия сохранять работоспособное состояние после воздействия на него определённого ВВФ в пределах заданных значений.

Рабочее тело – газообразное или жидкое вещество, с помощью которого осуществляется преобразование какой-либо энергии при получении холода, тепла или механической работы.

Рабочий раствор – специальная среда, представляющая собой раствор органических и (или) неорганических веществ, применяемый для дезинфекции, дезактивации, стерилизации и дегазации.

Радиационное разогревание – повышение температуры конструктивных элементов изделий, облучаемых ионизирующим излучением, в результате превращения поглощённой материалами этих изделий энергии излучения в тепловую энергию.

Радиоактивный аэрозоль – аэрозоль, в состав дисперсной фазы которого входят радионуклиды.

Сейсмический удар – сейсмическое воздействие, вызванное искусственными взрывами.

Сейсмическое воздействие – подземные удары и колебания поверхности, вызванные естественными и искусственными причинами.

Специальная среда (среды) – неорганические и органические соединения, масла, смазки, растворители, топлива, рабочие растворы, рабочие тела, внешние по отношению к изделию, которые вызывают или могут вызвать ограничение или потерю работоспособного состояния изделия.

Среда заполнения – среда, используемая для заполнения объёма, в котором эксплуатируется изделие.

Статическая пыль (статический песок) – аэрозоль с твёрдой дисперсной фазой пылью (песком), находящийся в статическом состоянии.

Статическое давление – механическое давление, интенсивность, точка приложения и направление которого изменяются во времени настолько медленно, что силы инерции не учитываются.

Стойкость изделия к ВВФ – свойство изделия сохранять работоспособное состояние во время и после воздействия на изделие определённого ВВФ в течение всего срока службы в пределах заданных значений.

Тепловой удар – воздействие резкого изменения температуры окружающей среды.

Ударная волна – распространяющаяся со сверхзвуковой скоростью переходная область в газе, жидкости или твёрдом теле, в которой происходит резкое увеличение плотности, давления и скорости среды.

Ультразвуковое разогревание – повышение температуры конструктивных элементов изделия под воздействием ультразвука, в результате превращения энергии ультразвуковых колебаний в тепловую энергию.

Устойчивость изделия к ВВФ – свойство изделия сохранять работоспособное состояние во время действия на него определённого ВВФ в пределах заданных значений.

Шум – нерегулярное или статистически случайное колебание.

Электрическое разогревание – повышение температуры конструктивных элементов изделия под воздействием электрического поля, в результате превращения электрической энергии в тепловую энергию.

Эффективное значение ВВФ – условное постоянное значение ВВФ, принимаемое при расчётах номинальных параметров изделия, влияющих на срок службы и (или) сохраняемости, существенно зависящих от данного ВВФ и нормированных для работы в течение срока службы и (или) сохраняемости.

Воздействие – действие физическое (механическое или влияние), оказываемое на здания, сооружения, системы, элементы, персонал, население и объекты окружающей среды.

Внешнее воздействие на объект – воздействие, оказываемое на объект исследования внешними процессами, явлениями и факторами техногенного или природного происхождения.

Воздействие природное – воздействие, вызванное внешними процессами, явлениями и факторами природного происхождения.

Воздействие техногенное – воздействие, вызванное непосредственно деятельностью человека или как результат использования им техники и технологий.

Детерминистический подход – подход проектирования или конструирования на основе полностью определённых данных о параметрах воздействий и свойствах объекта с учётом установленных норм с коэффициентами запаса предельных значений контролируемых параметров.

Защита работников (персонала) – комплекс технических мер и организационных мероприятий, обеспечивающих заданный уровень безопасности персонала.

Защитные барьеры – барьеры, представляющие собой комплекс технических средств, предназначенных для удержания опасных веществ и излучения в пределах, заданных конкретным объектом.

Катастрофа природная и техногенная – катастрофа, произошедшая вследствие внешних воздействий природного или техногенного происхождения, которая сопровождается последствиями глобального или регионального масштаба, сопряжёнными с нанесением невосполнимого урона окружающей среде, с многочисленными человеческими жертвами, прямыми экономическими потерями и затратами на ликвидацию этих последствий.

Мониторинг – система наблюдений за процессом (явлением, фактором) природного или техногенного происхождения, состоянием окружающей среды, объекта, а также оценка и прогноз их изменений и развития.

Работоспособность системы – свойство системы выполнять заданные функции в течение установленного периода времени в предписанных эксплуатационных пределах и условиях.

Расстояние безопасное (учитываемое) – расстояние от источника опасности до объекта, за пределами которого можно пренебречь возможными внешними воздействиями на него природного или техногенного происхождения.

Риск – сочетание вероятности нанесения ущерба и тяжести этого ущерба в виде негативных последствий (разрушение, повреждение здания, сооружения, системы, элемента, нарушение в работе, авария и связанные с ними опасности нанесения ущерба жизни и здоровью че-

ловека и (или) ущерба окружающей среде) при внешних воздействиях природного или техногенного происхождения.

Сейсмоизоляция сооружения (здания) – комплекс инженерных конструкций, устраиваемых, как правило, в фундаменте сооружений и обеспечивающих снижение колебаний изолируемого сооружения относительно сейсмических колебаний грунтов основания, а также элементы и системы, обеспечивающие регулирование (сдвиг) значенных собственных частот колебаний сооружения в желаемую область.

Стойкость системы (элемента) при внешних воздействиях – свойство системы (элемента) сохранять показатели выполнения своих функций и значения параметров системы (элемента) в течение установленного периода времени в условиях нормальной эксплуатации и при внешних воздействиях природного и (или) техногенного происхождения (сейсмостойкость, вибростойкость, коррозионная стойкость и т.п.) в пределах, установленных нормами и (или) техническими условиями на проектирование и эксплуатацию систем (элементов).

Сценарий состояний объекта или сложной технической системы – логическая последовательность взаимосвязанных состояний объекта или сложной технической системы, возможных при внешних воздействиях природного и (или) техногенного происхождения.

Факторы внешнего воздействия выражают свойства объекта и характеризуют его взаимодействие с окружающей средой. Факторы внутреннего воздействия выражают свойства объекта, связанные с его структурой и сущностью. В динамике внешние факторы характеризуют процессы взаимодействия объекта со средой, а внутренние – процессы внутри объекта.

В зависимости от особенностей, объект воздействует на окружающую среду. Особенности объекта определяются его организацией, то есть материалами из которых он состоит, структурой, взаимодействием составных частей, видами преобразования энергии, способом выведения за пределы объекта продуктов его жизнедеятельности либо просто потерями вещества и энергии при взаимодействии объекта с внешней средой. Известно, что воздействие объекта на окружающую его среду неизбежно в большей или меньшей степени изменяет ее, а, следовательно, и характер и степень ее воздействия на объект. Для обозначения подобных процессов применяется термин "обратная связь".

В процессе воздействия среды на объект можно выделить отдельные факторы. Под факторами внешнего воздействия понимают

выделенную из совокупности сторону, процесс, механизм воздействия среды на рассматриваемый объект.

Функционирование объекта не ограничивается его взаимодействием с внешней средой, очень часто более важными представляются взаимодействия его составных частей с точки зрения их влияния на функционирование объекта и изменение параметров во времени. К факторам внутреннего воздействия следует относить изменения во времени свойств материалов объекта, видов его организации и т.п.

Классификация факторов внешнего и внутреннего воздействия.

К **внешним факторам** относят действие окружающей среды и особенности эксплуатации, связанные с местом размещения продукции (изделия) и (или) условиями его транспортирования. Указанные внешние воздействия могут вызвать ограничение или потерю работоспособности продукции (изделия) или его составных частей в процессе эксплуатации.

Внутренними факторами являются процессы старения и изнашивания. Процессы старения происходят непрерывно, причём они совершаются как во время работы, так и во время хранения и транспортирования изделий. Изнашивание проявляется в основном в процессе эксплуатации и зависит от воздействия внешних факторов, от режимов эксплуатации и работы изделий. Вероятность влияния внутренних факторов возрастает по мере увеличения длительности эксплуатации и при нарушении режимов работы, которые могут характеризоваться частотой включений и переключений, вызывающей в изделиях переходные процессы; перенапряжение; толчки и т.д. Частые включения и переключения некоторых изделий могут также влиять на механическое изнашивание их конструктивных элементов. В изделиях, предназначенных для циклических режимов работы, существенное влияние на тепловые режимы оказывают соотношения продолжительности работы и перерывов. Действие внутренних факторов во многих случаях зависит от схемы и конструкции изделия.

По *времени и характеру* воздействия, режимы эксплуатации и работы изделий могут быть:

- непрерывными;
- периодическими (циклическими);
- аperiodическими (одноразовыми);
- повторно-прерывными;
- случайными.

В классификациях факторы обычно группируют по какому-либо признаку: *механические, климатические, биологические, радиационные, электромагнитные, специальных сред и термические.*

В свою очередь каждый класс подразделяется на группы, а каждая группа на виды, которым, кстати, соответствуют определенные виды испытаний.

Пример. Класс климатических воздействий делится на группы:

- атмосферное давление;
- температура среды;
- влажность воздуха или других газов и т.д.

Группы в свою очередь подразделяются на следующие виды:

- атмосферное повышенное или пониженное давление;
- изменение атмосферного давления или его перепады;
- повышенная и, соответственно, пониженная температура среды;
- изменение температуры среды и т.д.

Некоторые виды, группы и классы воздействий определяются назначением изделий и их взаимодействием со средами, создаваемыми человеком в процессе его деятельности. К таким классам относятся классы ВВФ:

- специальных сред;
- радиационные;
- электромагнитные;
- термические.

К *механическим* факторам относят две группы: факторы статического воздействия и факторы динамического воздействия. К факторам статического воздействия относятся следующие виды:

- растяжение;
- сжатие;
- изгиб;
- кручение;
- срез;
- вдавливание.

Очевидно, что классификация ВВФ повторяет виды деформации материалов.

К механическим факторам динамического воздействия относятся такие их виды, как воздействие:

- удара;

- ускорения (линейного или углового), вызывающее перегрузки либо состояние полной или частичной невесомости;

- вибрационное;
- акустического шума.

Среди *климатических* факторов обычно выделяют воздействия:

- солнечного излучения (в приповерхностных слоях атмосферы);
- влаги содержащейся в воздухе или любой смеси газов (под влагой не обязательно понимать только пары воды - это могут быть и пары любой другой жидкости так, например, в атмосфере Юпитера роль воды, по-видимому, играет метан, во внутренней атмосфере космического аппарата эту роль может выполнять жидкое рабочее тело какой-либо из его систем, попавшее внутрь аппарата в результате протекания магистралей);

- выпадающих осадков, к которым обычно относят дождь, изморозь, снег, лед и т.п.

- атмосферы (газовый состав, наличие примесей в виде жидких и твердых аэрозолей, частиц пыли, песка.);

- давления аэростатического либо гидростатического (нормального, повышенного, пониженного), его изменений или перепадов.

К климатическим факторам можно отнести и такой, фактор (механический по своей природе), как воздействие движения среды, то есть ветер, волновое движение жидкости и т.п.

В *биологических* факторах обычно выделяют воздействие на технические системы:

- плесневых грибов и других микроорганизмов;
- насекомых;
- грызунов.

Иногда в виде биологического фактора воздействия внешней среды могут выступать пресмыкающиеся или животные.

Целесообразно включить в этот класс факторов и воздействие человека, которое по своей разрушительности и масштабам может превзойти воздействие других биологических факторов.

К *радиационным* факторам относят совокупность ионизирующих излучений, с которыми техническая система может столкнуться в условиях нормальной эксплуатации. Это потоки γ -частиц, протонов и нейтронов; рентгеновского и ультрафиолетового излучений. Необходимо отметить, что факторы этого класса по большей части имеют техногенное происхождение.

Необходимо также учитывать отдельный класс факторов воздействия – *специальные среды*. Имеется в виду воздействие в основном химическое, то есть воздействие кислот, щелочей, растворителей и растворов химически активных веществ.

Термические воздействия в некоторых случаях рассматриваются как часть климатических воздействий, а в иных случаях их выделяют в отдельный класс. К ним относят воздействие повышенной, пониженной температуры, ее периодические (так называемое термоциклирование) и непериодические изменения.

К факторам внешнего воздействия *космического* пространства можно отнести воздействие:

- вакуума;
- собственной внешней атмосферы космического аппарата;
- атмосферы планеты (состав и температура атмосферы);
- потоков нейтральных частиц в зависимости от их состава и скорости;
- потоков заряженных частиц, генерируемых в атмосфере планеты;
- "солнечного ветра";
- солнечного космического излучения;
- электромагнитного излучения солнца (обычно весь спектр его электромагнитных излучений разбивают на ряд участков);
- отраженного планетой солнечного излучения;
- собственного теплового излучения планеты (косвенно этот фактор характеризует температуру грунта планеты и степень его черноты);
- галактических космических излучений;
- потоков межпланетной пыли и метеорных частиц;
- магнитного поля планеты;
- вмороженного магнитного поля "солнечного ветра" и т.д.

Иногда одновременное действие нескольких факторов классифицируется как независимый фактор, так одновременное воздействие вибрации и ударного нагружения классифицируется как тряска – еще один вид механической нагрузки на технические объекты.

Классификация, приведенная выше, не является полной и универсальной. Для различных технических объектов и систем набор ВВФ будет свой, отражающий как особенности объекта, так и условия его эксплуатации.

Воздействие внешних и внутренних факторов на материалы изделий проявляется в основном путем:

- адсорбционного;
- диффузионного;
- химического;
- коррозионного;
- радиационного механизмов воздействия.

Происходящие при этом физико-химические процессы приводят к изменениям значений параметров и характеристик материалов и изделий, в ряде случаев вызывающим отказы. Возможны изменения необратимые и обратимые. Примерами необратимых изменений являются коррозия металлов, изменение структуры материалов при интенсивном радиоактивном облучении и т.д. К обратимым изменениям относятся такие, как восстановление свойств материала, адсорбированного газа или влагу своей поверхностью; восстановление свойств, значений параметров и характеристик изделий после прекращения температурных воздействий и т.п.

Таким образом, возникновение отказов можно представить как временной кинетический процесс, зависящий от изменения структуры и свойств материалов изделия.

Физико-химические процессы, возникающие в материалах, могут происходить внутри изделия или на его поверхности, в электрических цепях, в подвижных и неподвижных соединениях. Причиной, приводящей к появлению указанных процессов, является воздействие внешней энергии, превращающейся при этом из одного вида в другой.

Наиболее часто на изделия воздействуют следующие *виды энергии*:

- тепловая;
- электрическая;
- электромагнитная;
- механическая;
- химическая.

Каждому виду энергии соответствует определенный характер взаимодействия между частицами в соответствующих энергетических полях. Под действием энергии одного или нескольких видов в изделиях возникают физико-химические процессы, которые могут приводить к отказам. Наиболее распространены следующие причины возникновения отказов:

- тепловое разрушение (потеря тепловой устойчивости, перегорание, расплавление и т.д.);
- деформация и механическое разрушение, включая нарушение контактов, обрывы и короткие замыкания, нарушение механических фиксаций и т.д.;
- электрическое разрушение (пробой, нарушение электрической прочности и т.д.);
- электрохимическая коррозия;
- радиационное разрушение;
- изнашивание изделий и их деталей;
- загрязнение поверхностей деталей и изделий (нарушение контактов, изменение фотометрических характеристик, ухудшение зрительного восприятия информации и т.д.)

Одним из путей повышения качества изделий можно считать изучение физико-химических процессов в материалах, элементах и готовых изделиях, происходящих на стадии эксплуатации, с целью их учёта на стадиях разработки и производства.

Комбинированные внешние воздействия.

Изделие, как правило, работает одновременно под действием нескольких внешних воздействий, описываемых соответствующими параметрами. Рассмотрение комбинаций внешних воздействий особенно важно, когда работа продукта в случае одновременно (параллельно) приложенных воздействий отличается от работы продукта в случае последовательно приложенных воздействий.

При подборе расчетных внешних воздействий для конкретного приложения продукта рекомендуется проверить все внешние воздействия, комбинацию которых необходимо принимать во внимание.

Последовательность внешних воздействий.

При рассмотрении работы продукта под действием внешних условий необходимо учитывать возможность прямого приложения одного или нескольких воздействий (параметров) в прямой последовательности. Вот два важных примера:

- тепловой удар, который является результатом приложения к продукту высоких температур сразу после приложения к нему низких температур (или наоборот) или погружение продукта в воду (дождь, потоки воды, морские волны, просто погружение) сразу после нагрева до высоких температур;
- обледенение, которое может быть результатом охлаждения продукта до температуры ниже точки замерзания непосредственно

перед или после помещения изделия во влажную среду, под дождь или в недождевую воду, полученную из других источников.

Целесообразно принять данные возможности в расчет при определении внешних условий, в которых работает реальный продукт.

Особое значение приобретают знания указанных процессов для правильной организации испытаний и анализа их результатов.

3.5. Технологическая себестоимость изделия

Часть себестоимости изделия, определяемая суммой затрат на осуществление технологических процессов изготовления изделия называется технологической себестоимостью, которая характеризует в стоимостном выражении ресурсоемкость изделия с учетом его конструктивных особенностей в сферах производства, эксплуатации и ремонта. Разновидностями этого показателя, определяемыми затратами ресурсов в конкретных областях проявления ТКИ, являются:

- технологическая себестоимость изделия в технической подготовке производства (ТПП);
- технологическая себестоимость изделия в изготовлении;
- технологическая себестоимость изделия в техническом обслуживании;
- технологическая себестоимость изделия в ремонте;
- технологическая себестоимость изделия в утилизации.

В общем виде технологическая себестоимость изделия C_T рассчитывается по формуле 3.1:

$$C_T = C_M + C_3 + C_{н.р}, \quad (3.1)$$

где C_M – стоимость материалов, затраченных на изготовление (техническое обслуживание, ремонт) изделия;

C_3 – заработная плата рабочих с начислениями;

$C_{н.р}$ – накладные расходы, включающие расходы на электроэнергию, потребляемую оборудованием, на амортизацию оборудования, инструмента и приспособлений, на смазочные, охлаждающие, обтирочные и другие материалы, предусмотренные процессом проведения работ.

Наряду с абсолютной технологической себестоимостью изделия в качестве показателя ТКИ применяют удельную технологическую себестоимость по области ее проявления.

Удельную производственную технологическую себестоимость изделия рассчитывают по формуле 3.2:

$$C_{\Pi}^{y\partial} = C_{\Pi} / P \cdot \tau, \quad (3.2)$$

где C_{Π} – производственная технологическая себестоимость изделия, руб.;

τ – установленный срок службы изделия в эксплуатации;

P – номинальное значение основного параметра изделия, или полезный эффект от его эксплуатации.

Характеристики и параметры должны удовлетворять тем же требованиям, что и при расчёте материалоемкости изделия.

Удельную эксплуатационную технологическую себестоимость изделия рассчитывают по формуле 3.3:

$$C_{\text{Э}}^{y\partial} = C_{\text{Э}} / P \cdot \tau, \quad (3.3)$$

где $C_{\text{Э}}$ – эксплуатационная технологическая себестоимость изделия, руб.

При сравнительном анализе вариантов конструкции изделия по технологической себестоимости необходимо выполнять те же требования, что и для оценки трудоёмкости и материалоемкости изделия. Расчётные методы определения трудоёмкости и материалоемкости изделия рекомендуются также для использования при укрупнённом определении технологической себестоимости изделия.

РАЗДЕЛ 4. ПРИЧИНЫ ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Износ – основная причина выхода из строя большинства деталей машин. На процессы трения и изнашивания существенное влияние оказывает качество поверхности деталей.

4.1. Трение и изнашивание

Триботехника – наука о контактном взаимодействии твердых тел при их относительном движении, охватывающая весь комплекс вопросов трения, изнашивания и смазки машин. В триботехнике получили развитие отделы *трибохимия*, *трибофизика* и *трибомеханика*.

Некоторые термины, относящиеся к триботехнике, стандартизованы. ГОСТ 23.002-78 включает 97 терминов, которые расквалифицированы по трем видам трения, изнашивания, смазки, методам смазывания и смазочным материалам. К общим понятиям триботехники относятся следующие термины:

Внешнее трение – явление сопротивления относительному перемещению, возникающее между двумя твердыми телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним, сопровождаемое диссипацией энергии.

Трение покоя – трение двух тел при микроперемещениях до перехода к относительному движению.

Трение движения – трение двух тел, находящихся в относительном движении.

Трение скольжения – трение движения двух твердых тел, при котором скорости тел в точках касания различны по величине и по направлению, или по величине или направлению.

Трение качения – трение движения двух твердых тел, при котором их скорости в точках касания одинаковы по величине и направлению.

Сила трения – сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы» направленной по касательной к общей границе между этими телами.

Поверхность трения – поверхность тела, участвующая в трении.

Коэффициент трения – отношение силы трения двух тел к нормальной силе, прижимающей эти тела друг к другу.

Изнашивание – процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющейся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

Износ – результат изнашивания, определяемый в установленных единицах. Величина износа может выражаться в единицах длины, объема, массы и др.

Износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания.

Скорость изнашивания $\gamma = du/dt$ (мкм/ч) – отношение величины износа ко времени, в течение которого возник износ.

Интенсивность изнашивания $J = du/ds$ – отношение величины износа к относительному пути трения (s), на котором происходило изнашивание. Эта величина будет безразмерной, если износ и путь трения измеряются в одних единицах.

Смазка – действие смазочного материала, в результате которого между двумя поверхностями уменьшается сила трения и (или) интенсивность изнашивания.

Трение имеет молекулярно-механическую природу. На площадках фактического контакта поверхностей действуют силы молекулярного притяжения, которые проявляются на расстояниях, в десятки раз превышающих межатомное расстояние в кристаллических решетках, и увеличиваются с повышением температуры. Молекулярные силы при наличии либо отсутствии промежуточной вязкой прослойки (влаги, загрязнения, смазочного материала и т.п.) вызывают на том или ином числе участков адгезию.

Адгезия – слипание разнородных твердых или жидких тел (фаз), соприкасающихся своими поверхностями. Явление адгезии может быть обусловлено одновременно и действием электрических сил.

Более сильным проявлением молекулярных сил является схватывание поверхностей. Сила трения в этом случае зависит от протяженности зон схватывания и сопротивления их разобщенности. Сила трения T обусловлена механическим и молекулярным взаимодействиями:

$$T = a \cdot S_{\phi} + b \cdot P, \quad (4.1)$$

где a – средняя интенсивность молекулярной составляющей силы трения; S_{ϕ} – фактическая площадь контакта; b – коэффициент, характеризующий механическую составляющую силы трения; P – внешняя сила.

Коэффициент трения f представляет собой отношение силы трения к внешней силе. На основании формулы (4.1) коэффициент трения равен:

$$f = \frac{a \cdot S_{\phi}}{P} + b, \quad (4.2)$$

Двучленные выражения вида (4.1) и (4.2) для силы трения и коэффициента трения действительны для трения со смазочным материалом и без него.

Трение без смазочного материала. Реализуется в том случае, когда сопрягаемые поверхности покрыты только оксидными пленками или адсорбированными пленками воды и газа. Имеет место в тормозах, фрикционных передачах и узлах трения, где недопустимо применение смазочных материалов (машины текстильной, пищевой, химической промышленности) либо их применение невозможно вследствие высокой температуры в зоне контакта. Обычно для узлов трения, работающих без смазочных материалов, одно из тел трения изготавливают из композита, содержащего твердое смазывающее вещество (дисульфид молибдена, диселенид вольфрама, графит) или пластические металлы. Твердые смазочные материалы, обладая слоистой структурой и низким сопротивлением сдвигу, снижают силу трения и интенсивность изнашивания трущихся тел.

Трение при граничной смазке. В этом случае поверхности сопряженных тел разделены слоем смазочного материала весьма малой толщины (от толщины одной молекулы до 0,1 мкм). Наличие граничного слоя или граничной пленки снижает силы трения по сравнению с трением без смазочного материала в 2...10 раз и уменьшает износ сопряженных поверхностей в сотни раз.

Молекулы смазочного материала ориентируются перпендикулярно твердой поверхности, что позволяет представить граничную смазку в виде ворса.

Невозобновляемая граничная пленка по мере возрастания пути трения изнашивается, масло пленки адсорбируется на продукты износа и уносится с поверхности трения.

Добавление в граничные слои смазочного материала и водных растворов поверхностно-активных веществ повышает толщину граничного слоя и способствует уменьшению износа (до двух раз).

При граничной смазке на трение и износ оказывают влияние как характеристики сопряжённых материалов, так и свойства смазочного материала. Износ может происходить при локальных разрывах масляной пленки и при передаче усилий через эту пленку, которая играет роль эластичной прокладки и обладает некоторыми свойствами квазитвердого тела.

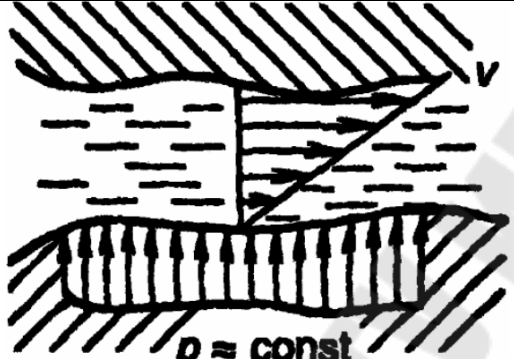
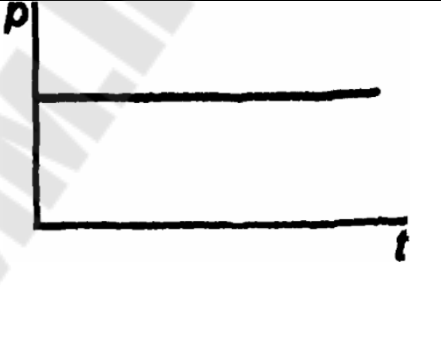

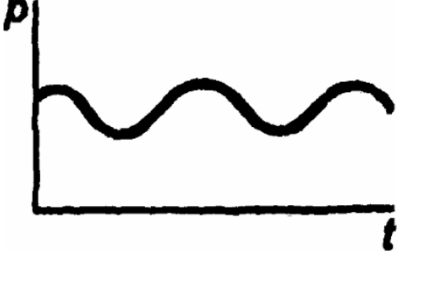
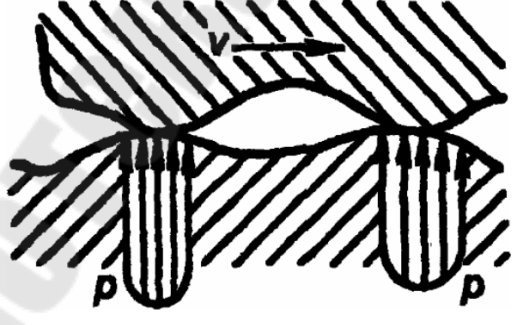

Жидкостное трение. Этот вид трения характеризуется тем, что трущиеся поверхности разделены слоем смазки жидкого смазочного материала (масла), находящегося под давлением. Давление смазочного материала уравнивает внешнюю нагрузку. Слой смазочного материала – несущий слой. При жидкостной смазке сопротивление движению определяется внутренним трением (вязкостью) жидкости и складывается из сопротивления скольжению масла по толщине смазочной прослойки. Этот режим трения со свойственными ему весьма малыми коэффициентами трения является оптимальным для узла трения с точки зрения потерь энергии, долговечности и износостойкости. Силы трения при жидкостной смазке не зависят от природы сопрягаемых поверхностей.

Для осуществления жидкостной смазки необходимо, чтобы наименьшая толщина смазочного слоя при гладких поверхностях и прочих идеальных условиях была не меньше толщины, при которой проявляются объёмные свойства жидкости. Для шероховатых поверхностей наименьшая толщина слоя – минимальное расстояние между вершинами выступов неровностей сопрягающихся поверхностей. Однако жидкостное трение обладает рядом недостатков. *Во-первых*, оно связано с существенным усложнением конструкции системы смазки. *Во-вторых*, наличие масляного слоя между поверхностями, величина которого зависит от нагрузки, может нарушить точность перемещения узла.

В последние годы появились высокооборотные узлы (шпиндели внутришлифовальных станков, малогабаритные турбины) на аэродинамических опорах, а также поступательные пары на воздушной (аэро-статической) подушке, где поверхности разделяет слой воздуха, который служит смазкой. При надёжном разделении поверхностей смазкой износ практически исключается, он возможен только лишь в результате физико-химического действия жидкой среды или газа, в

периоды нарушения жидкостного трения или попадания в смазочный материал абразивных частиц или за счет процесса кавитации.

Влияние вида трения на условия взаимодействия микровыступов сопряжённых поверхностей схематично показано на рисунке 3.1. При жидкостном трении каждый участок поверхности нагружен постоянным давлением, не изменяющимся при относительном перемещении поверхностей, т.е. статической нагрузкой. Эта нагрузка не в состоянии разрушить микровыступы, так как возникающие напряжения находятся в области больших запасов прочности.

Вид трения	Схема	Нагрузка на микровыступы
Жидкостное		
Граничное		
Сухое		

При граничном трении, хоть и происходит перераспределение внешней нагрузки, имеются более нагруженные зоны в месте сближения микровыступов. Поэтому при относительном движении тел возникает колебание напряжений в каждом выступе и создаются условия

для их усталостного разрушения. Однако коэффициент асимметрии цикла $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ (где σ_{\min} и σ_{\max} соответственно минимальное и максимальное напряжение цикла нагружения) в этом случае близок к единице из-за эффекта выравнивания эпюры давлений, и поэтому интенсивность разрушения микровыступов значительно снижается. Кроме того, слой смазочного материала предотвращает молекулярное взаимодействие. При сухом трении имеет место непосредственный контакт микровыступов, и нагрузка концентрируется в отдельных зонах. При относительном перемещении напряжение в микровыступах может падать до нуля ($\sigma_{\min} = 0$) и коэффициент асимметрии цикла равен нулю или имеет малую величину. Здесь создаются условия для усталостного разрушения или пластической деформации микровыступов, что приводит к усталостному или абразивному, а при наличии оксидных пленок – к окислительному изнашиванию.

Полужидкостное трение. Имеет место при наличии одновременно жидкостной и граничной смазки.

4.2. Механизм изнашивания

Процесс изнашивания может быть разделён на три явления: взаимодействие поверхностей трения; изменения, происходящие в поверхностном слое металла; разрушение поверхностей. Эти явления не последовательны – они непрерывно переплетаются, взаимно влияя друг на друга.

Взаимодействие поверхностей может быть механическим и молекулярным. Механическое взаимодействие выражается во взаимном внедрении, зацеплении неровностей поверхностей в совокупности с их соударением в случае скольжения грубых поверхностей.

Молекулярное взаимодействие проявляется в виде адгезии и схватывания. Схватывание свойственно только металлическим поверхностям и отличается от адгезии более прочными связями. Молекулярное взаимодействие возможно также на участках взаимного внедрения поверхностей. Оно обязательно будет при разрушении масляной пленки.

Изменения на поверхности трения вызваны деформациями, повышением температуры и химическим действием окружающей среды.

Изменения, вызванные деформацией. Многократные упругие деформации из-за несовершенства структуры материала приводят в определённых условиях к усталостному выкрашиванию поверхностей

качения, а многократные упругие деформации микронеровностей поверхностей скольжения разрыхляют структуру.

Пластическое деформирование изменяет структуру материала поверхностного слоя. Разрушение структуры – это заключительный этап пластической деформации по мере увеличения силового воздействия при однократном нагружении. Смещение кристаллических зерен сопровождается частичным нарушением сцепления, в результате при возрастании напряжения или многократном его повторении происходит ослабление, разрыхление, а в дальнейшем и разрыв структуры.

Пластическая деформация при температуре ниже температуры рекристаллизации способствует наклепу поверхностного слоя – его упрочнению. Однако у самой поверхности структура несколько ослаблена, микротвердость понижена. Последняя достигает максимума на некоторой глубине, далее уменьшается до исходной.

При сильно отличающихся по твердости структурных составляющих материала и многократном воздействии нагрузки происходит вначале интенсивное изнашивание мягкой основы, вследствие этого повышается давление на выступающие твердые составляющие, они вдавливаются в мягкую основу, некоторые из них дробятся и перемещаются дополнительно под действием сил трения. В результате такого избирательного изнашивания поверхность обогащается твердыми структурными составляющими и приобретает строчечную структуру.

Влияние повышения температуры. Если по условиям эксплуатации или в результате трения температура поверхностных слоёв выше температуры рекристаллизации металла, то поверхностный слой не наклёпывается, а пребывает в состоянии повышенной пластичности.

Высокая температура и пластическая деформация способствуют диффузионным процессам; в итоге возможно обогащение поверхности некоторыми элементами (например, поверхности стали углеродом), коагуляция отдельных структурных составляющих, взаимное диффузионное растворение материалов деталей пар трения.

При интенсивном локальном повышении температуры (температурная вспышка) и последующем резком охлаждении окружающей холодной массой металла на поверхности могут образовываться закалочные структуры. Этому способствует высокое давление (от нагруз-

ки), снижающее температуру, при которой происходят структурные превращения.

Пластическая деформация, возможные высокие температурные градиенты и структурные превращения, каждое в отдельности и совместно, вызывают напряжения в материале, которые могут влиять на его разрыхление. В условиях высоких нагрузок и температур возможно образование магмы-плазмы (рис. 4.2.). Взаимодействие микроконтактов происходит за очень короткое время ($10^{-7} \dots 10^{-8}$ с), в течение которого к контакту подводится большая энергия. В таких условиях материал поверхностного слоя преобразуется, в результате в зоне соударения неровностей образуется магма-плазма; процесс сопровождается эмиссией электронов.

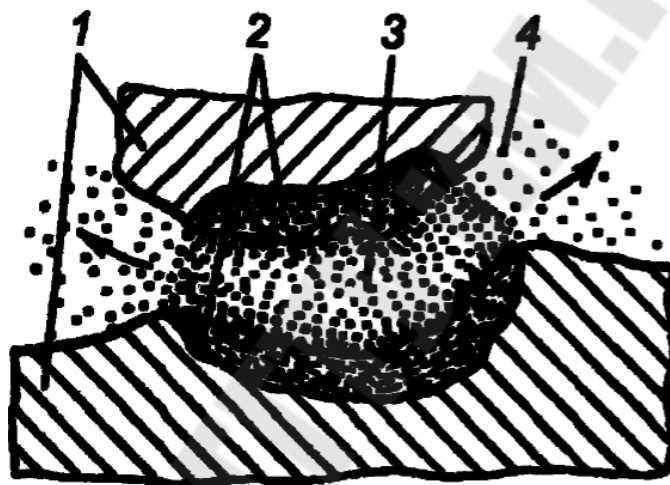


Рис. 4.2. Модель магмы-плазмы:

1 – исходная структура; 2 – расплавленная структура; 3 – плазма; 4 – электроны, движущиеся при трибоэмиссии

Химическое действие среды. В воздушной среде на обнажённых при изнашивании чистых металлических поверхностях образуются оксидные плёнки. Эти плёнки предохраняют поверхности от схватывания и связанного с ним глубинного вырывания и являются важным фактором не только при трении без смазочного материала, но и при полужидкой смазке. Металлические поверхности, взаимодействуя с химически активными присадками в масле, покрываются плёнками химических соединений, роль которых аналогична роли оксидных плёнок. Возможно насыщение поверхности углеродом в результате разложения смазочного материала при высокой температуре. Агрессивные жидкости и газовые среды активизируют изнашивание.

4.3. Классификация процессов изнашивания

Механическое изнашивание возникает в результате механических взаимодействий контактирующих поверхностей. Оно бывает абразивным (гидро-газоабразивным), эрозионным (гидрогазоэрозионным), усталостным и кавитационным.

Изнашивание под действием электрического тока может быть отнесено к эрозионному (электроэрозионному) изнашиванию.

Разновидность этих процессов характеризуется специфическими явлениями, вызывающими разрушение микрообъемов материала при трении и неодинаковой интенсивности процесса.

Молекулярно-механическое изнашивание обусловлено адгезионными явлениями на пятнах фактического контакта. В результате этих явлений образуются мостики сварки, разрушаемые под действием тангенциальной силы. Разрушение может происходить по объему одного из элементов пары трения. Молекулярно-механическое изнашивание проявляется в виде схватывания и заедания.

Коррозионно-механическое изнашивание вызвано химическими процессами, обусловленными импульсным, тепловым и механическим взаимодействием на материал вступающих в контакт неровностей поверхностей трения. Проявляется в форме окислительного изнашивания и изнашивания при фреттинг-коррозии.

Абразивное изнашивание характеризуется разрушением поверхности детали, возникающим в результате взаимодействия с твердыми частицами при относительной скорости. Хотя, как правило, принимаются меры для того, чтобы избежать износа такого рода, обладающего большой интенсивностью, нередко существуют причины для его возникновения.

Происходит это вследствие недостаточной фильтрации смазочного материала или наличия абразива на поверхности трения, попадающего из окружающей среды. Часто абразивные частицы являются продуктами износа – твердыми образованиями структурных составляющих разрушенных микрообъемов. Некоторые детали машин работают непосредственно в абразивной среде (лемеха плугов, зубья ковша экскаватора, траки гусениц, шары шаровых мельниц и др.).

Этот вид изнашивания может происходить весьма интенсивно и на достаточно смазанных поверхностях, когда приложенная нагрузка передается от одной детали к другой не только через слой смазочного материала, но и через абразивные частицы.

Гидро- и газоабразивное изнашивание, когда износ происходит в результате воздействия твёрдых частиц, увлекаемых потоком жидкости или газа, является разновидностью абразивного изнашивания.

Эрозионное изнашивание – разрушение поверхности материала вследствие механического воздействия высокоскоростного потока жидкости, газа или пара. Разрушение металлов под воздействием электрических разрядов также относится к эрозии.

Эрозионное воздействие высокоскоростного потока жидкости, газа или пара в чистом виде складывается из трения сплошного потока и его ударов о поверхность. В результате трения происходит расшатывание и вымывание отдельных объёмов материала. Скорость изнашивания в этом случае мала. Значительно большая роль принадлежит динамическому воздействию потока или струи. В зависимости от свойств материала возможны вырывы отдельных объёмов или групп зерен. В пластичных материалах, обладающих способностью наклепываться, вначале накапливаются микропластические деформации отдельных участков, а когда способность к упрочнению исчерпается, эти участки разрушаются, вымываются. Жидкость, внедряющаяся при ударах в образовавшиеся микротрещины, ведёт себя подобно клину, раздвигая боковые стенки.

Эрозия в начальный период на гладкой поверхности развивается весьма медленно, но после появления поражённых мест усиливается. Это объясняется повышением хрупкости повреждённого поверхностного слоя в связи с накоплением микротрещин, расклинивающим действием жидкости и усилением ударного действия из-за большого вихреобразования у поверхности.

Разрушению от эрозии часто подвергаются поверхности золотников гидравлических агрегатов, стальные и чугунные поршневые кольца авиационных двигателей.

Если поток содержит абразивные частицы, то изнашивание становится *эрозионно-абразивным*.

Эрозия и коррозия весьма часто протекают совместно. Коррозионно-эрозионное изнашивание представляет собой разновидность коррозионно-механического изнашивания. Роль обоих факторов зависит от соотношения механического и химического воздействия на материал. В качестве типичного примера можно привести гребные винты, разрушение которых происходит от коррозии и эрозии.

Усталостное изнашивание – результат циклического воздействия на микровыступы трущихся поверхностей. Отделение частицы

износа может происходить в результате наклёпа поверхностного слоя, который становится хрупким и разрушается (иногда его называют *изнашивание при хрупком разрушении*).

Различают контактную усталость и усталостное изнашивание.

Контактная усталость возникает при качении без проскальзывания и проявляется в развитии местных очагов разрушения (питтинг).

Усталостное изнашивание характерно для трения скольжения и проявляется в отделении микрообъёмов поверхности.

В сопряжениях «кулачок-ролик», зубчатые передачи, опоры качения и другие могут иметь место оба вида разрушения. При большом проскальзывании основную роль играет изнашивание, которое интенсивнее, чем образование питтинговых разрушений поверхности.

Кавитационное изнашивание обусловлено образованием в движущемся по поверхности твёрдого тела потоке жидкости пустот в виде пузырей, полос и мешков, наполненных парами, воздухом или газами, растворёнными в жидкости или выделившимися из неё. Это происходит по следующим причинам. В движущемся с большой скоростью потоке при его сужении или наличии препятствий на его пути давление может упасть до давления, соответствующего давлению парообразования при данной температуре. При этом, в зависимости от сопротивления жидкости растягивающим усилиям может произойти разрыв, нарушение сплошности потока. Образующаяся пустота заполняется паром и газами, выделившимися из жидкости. Парогазовые пузыри размерами порядка десятых долей миллиметра, перемещаясь вместе с потоком, попадают в зоны высоких давлений. Пар конденсируется, газы растворяются, и в образовавшиеся пустоты с громадным ускорением устремляются частицы жидкости; происходит сопровождаемое ударом восстановление сплошного потока.

Кавитация наблюдается в трубопроводах, в гидромоторах и в потоках, обтекающих лопасти центробежных и пропеллерных насосов и лопастей гидравлических турбин и гребных винтов. Явление кавитации вызывает вибрации, стуки и сотрясения, что приводит к расшатыванию крепёжных связей, обрыву болтов, смятию резьб, фрикционной коррозии стыков, нарушению уплотнений и усталостным поломкам.

Кавитация понижает КПД машин и гребных винтов и вызывает непосредственное разрушение поверхностей деталей в зоне ее действия.

Предпосылки для наступления и протекания кавитационного изнашивания следующие. При замыкании до полного исчезновения парогазовых пузырей у поверхности детали последняя подвергается микроскопическим гидравлическим ударам (рис. 4.3)



Рис. 4.3. Схема гидравлических ударов при сокращении кавитационного пузыря

Под воздействием ударов поверхность металла деформируется и наклёпывается на малую глубину. Многократно повторяющиеся удары вызывают разупрочнение, перенаклеп материала на отдельных микроучастках, сопровождающееся возникновением очагов разрушения в виде трещин. Разрушается прежде всего менее прочная структурная составляющая (в сталях – феррит; в чугунах – графитовые включения).

Закалка с нагревом ТВЧ, химико-термическая обработка, поверхностное упрочнение, в том числе твердые наплавки, способствуют повышению кавитационной стойкости.

Изнашивание при схватывании и заедании – явление прочного соединения металлов в результате взаимного трения или совместного деформирования при температуре ниже температуры рекристаллизации. При этом образуются прочные металлические связи в зонах непосредственного контакта поверхностей. В местах схватывания исчезает граница между соприкасающимися телами, происходит сращивание одно- и разноименных металлов.

Заедание – наиболее яркая форма проявления схватывания. При этом образуются широкие и глубокие борозды с неровными краями, иногда слившиеся; присутствуют крупные наросты; возможно оплавление поверхности. Может произойти полное заклинивание деталей.

Единой точки зрения на механизм процесса схватывания нет. Наиболее правдоподобной гипотезой является следующая. Для образования прочных металлических связей между металлами в холодном состоянии необходимо отсутствие на соприкасающихся поверхностях смазки, плёнок и загрязнений. Это условие признается в настоящее время обязательным.

Один и тот же металл, в зависимости от свойств плёнок на его поверхности, может обладать способностью к схватыванию или такую способность не проявлять.

Адгезионное действие при трении аналогично схватыванию.

Схватывание между металлическими поверхностями при некоторых режимах трения без смазочного материала возникает сравнительно легко. Пластическое деформирование на площадках фактического контакта и внедрение одной поверхности металла в другую создают условия для сдирания оксидных и адсорбированных плёнок масел, жиров, газов и влаги и образования узлов схватывания.

Узел схватывания – это местное соединение поверхностей, образующихся при трении в результате схватывания. Местное соединение поверхностей при трении вследствие адгезии называют *узлом адгезии*.

Необходимой предпосылкой для образования узла схватывания на поверхности трения является разрушение смазочной плёнки. Оно может произойти под действием высокой температуры при упругой деформации поверхностных слоёв, при наличии значительной пластической деформации или совместном действии повышенной температуры и пластической деформации.

Схватывание материалов проявляется в самых разнообразных формах. Начинается оно с субмикроскопических повреждений, переходя постепенно к локализованному разрушению поверхностного слоя и глубинному вырыванию. Затем разрушение может приобрести лавинный характер.

Окислительное изнашивание происходит в том случае, когда на соприкасающихся поверхностях образуются плёнки оксидов, которые в процессе трения разрушаются и вновь образуются. Продукты износа состоят из оксидов. От других видов коррозионно-механического изнашивания окислительное изнашивание отличается отсутствием агрессивной среды, протекает при нормальных и повышенных температурах, при трении без смазочного материала или при недостаточном его количестве. Интенсивность изнашивания может быть весьма значительной, но поверхности трения сохраняют малую шероховатость. Это объясняется тем, что оксиды препятствуют схватыванию поверхностей. При обычных температурах окисление поверхностей активируется пластической деформацией.

Для окислительного изнашивания необходимо, чтобы промежуток времени между последовательными разрушениями плёнки был

достаточен для образования плёнки относительно большой толщины. В случае циклического разрушения оксидов высокой твёрдости изнашивание будет иметь характер абразивного.

Одним из методов борьбы с окислительным изнашиванием является создание поверхностей трения с высокой твёрдостью.

Окислительному изнашиванию подвергаются калибры, детали шарнирно-болтовых соединений; тяг и рычагов механизмов управления; шарнирно-болтовых соединений в подвесных устройствах машин, работающих без смазочного материала – металлические колеса фрикционных передач и чашки вариаторов, а также некоторые детали в парах трения качения.

Повышение температуры способствует росту оксидных плёнок, а вибрация – их разрушению. Интенсивное окислительное изнашивание в подобных условиях встречается, например, в деталях крепления выхлопных коллекторов авиационных двигателей внутреннего сгорания. В ряде случаев интенсивность окислительного изнашивания можно уменьшить, сменив смазочный материал, понизив температуру узла. Необходимо отметить, что применение коррозионно-стойких сталей не даёт дополнительного эффекта в условиях окислительного изнашивания, кроме этого аустенитные стали склонны к схватыванию.

Изнашивание при фреттинг-коррозии – это процесс разрушения плотно контактирующих поверхностей пар металл-металл или металл-неметалл в результате малых колебательных перемещений. Для возбуждения фреттинг-коррозии достаточны перемещения поверхностей с амплитудой 0,025 мкм. Разрушение заключается в образовании на соприкасающихся поверхностях мелких язвин и продуктов коррозии в виде пятен, налёта и порошка. Этому виду изнашивания подвержены не только углеродистые, но и коррозионно-стойкие стали в парах трения сталь-сталь (могут быть как одноименные, так и разноименные), сталь-олово или алюминий, сурьма, а также чугун-бакелит или хром и многие другие пары трения.

Механизм изнашивания при фреттинг-коррозии в упрощенном виде представлен на рис. 4.4.

Первоначальное контактирование деталей происходит в отдельных точках поверхности (I). При вибрации оксидные плёнки в зоне фактического контакта разрушаются, образуются небольшие каверны, заполненные оксидными плёнками (II), которые постоянно увеличиваются в размерах и сливаются в одну большую каверну (III). В ней

повышается давление окислённых частиц металла, появляются трещины. Некоторые трещины сливаются, и происходит откалывание отдельных объёмов металла. Частицы оксидов производят абразивное воздействие. В результате действия повышенного давления и сил трения частиц оксидов повышается температура и образуются белые твердые нетравящиеся структуры в отколовшихся частицах и на поверхности каверн.

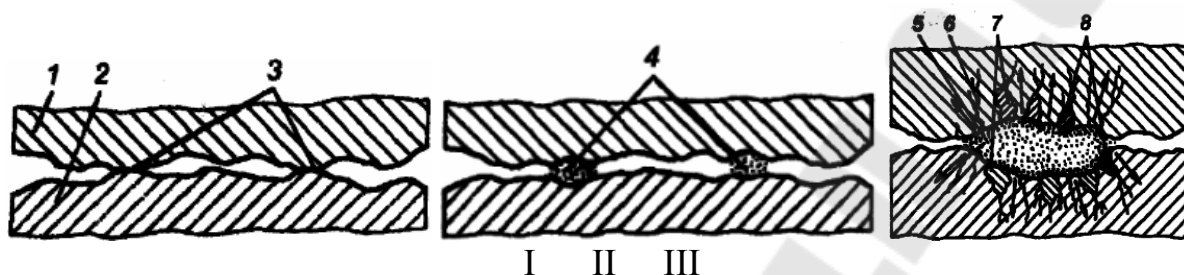


Рис. 4.4. Механизм изнашивания металлических поверхностей при фреттинг-коррозии: 1,2 – контактирующие детали; 3 – точки контакта поверхностей; 4 – мелкие зарождающиеся каверны; 5 – общая большая каверна; 6 – трещины; 7 – отколовшиеся объемы металла; 8 – отколовшиеся частицы с твердой структурой

Вследствие малой амплитуды перемещения соприкасающихся поверхностей повреждения сосредоточиваются на небольших площадках действительного контакта. Продукты износа не могут выйти из зоны контакта, в результате возникает высокое давление и увеличивается их абразивное действие на основной металл.

Фреттинг-коррозия осуществляется также в вакууме, в среде кислорода, азота и гелия. Существенную роль в процессе фреттинг-коррозии играет окисление поверхностей трения или металлических продуктов разрушения. Фреттинг-коррозия представляет особый вид разрушения металлов и их сплавов в мало- и неагрессивных коррозионных средах под одновременным воздействием механического и химического факторов.

Необходимые для протекания этого процесса относительные микроперемещения сопряжённых поверхностей совершаются вследствие деформации деталей под нагрузкой и вибрации их, а также колебаний, происходящих в упругих системах. Фреттинг-коррозия имеет место на сопряжённых поверхностях валов и напрессованных на них дисков, колес, муфт и колец подшипников качения на осях и ступицах колёс подвижного состава железных дорог, на запрессованных в кар-

тере вкладышах подшипников, на пригнанных поверхностях шпонок и их пазов, на затянутых стыках, в заклёпочных соединениях и др.

Как и при других видах изнашивания, универсальных средств борьбы с фреттинг-коррозией нет. Если исходить из того, что взаимное микроперемещение поверхностей не может быть исключено вследствие упругости материала, то для борьбы с фреттинг-коррозией следует: уменьшать микросмещения; снизить силы трения; сосредоточить скольжения в промежуточной среде.

Водородное изнашивание зависит от концентрации водорода в поверхностных слоях трущихся деталей. Водород выделяется из материалов пары трения или из окружающей среды (смазочного материала, топлива, воды и др.) и ускоряет изнашивание. Водородное изнашивание обусловлено следующими процессами, происходящими в зоне трения: интенсивным выделением водорода при трении в результате трибодеструкции водородсодержащих материалов, создающих источник непрерывного поступления водорода в поверхностный слой стали или чугуна; адсорбцией водорода на поверхности трения; диффузией водорода в деформируемый слой стали, скорость которой определяется градиентом температур и напряжений, что создает эффект накопления водорода в процессе трения.

Особым видом разрушения поверхности, связанным с одновременным развитием большого числа зародышей трещин по всей зоне деформирования и эффектом накопления водорода, характерным для разрушения, является мгновенное образование мелкодисперсного порошка материала.

Водородное изнашивание имеет особое значение для следующих отраслей техники: авиационной (тормозные колодки и барабаны колес); железнодорожного транспорта (пластмассовые колодки в тормозных устройствах); морского флота (узлы трения, самосмазываемые водой, например гребные валы и др.); деревообрабатывающей промышленности (инструмент и рабочие органы машин); техника, применяемая на Севере, и др.

4.4. Изнашивание при избирательном переносе

Избирательный перенос (ИП) при трении – это трение с новым смазочным материалом и наличием в зоне контакта неокисляющейся тонкой пластичной металлической плёнке, обладающей особой структурой и способностью к самовосстановлению при разрушении.

Металлическую защитную плёнку, образующуюся в процессе трения, называют «сервовитной» (от лат. – спасать жизнь). Она представляет собой вещество (в данном случае металл), образованное потоком энергии и существующее в процессе трения. Трение не может уничтожить плёнку, оно ее создаёт. Образование защитной пленки относится к новому классу самоорганизующихся явлений неживой природы.

При деформировании сервовитная пленка не разрушается и не подвергается усталостному разрушению. Она воспринимает все нагрузки, покрывая шероховатость поверхностей стальных деталей, которые практически не участвуют в процессе трения.

Механизм формирования сервовитной пленки в паре бронза-сталь при смазывании глицерином следующий. Глицерин является модельной жидкостью, которая легче других реализует режим работы ИП при трении указанной выше пары. В первый период работы происходит растворение поверхности трения бронзы. Глицерин действует при трении как слабая кислота. Атомы легирующих элементов бронзы (олово, цинк, железо, алюминий и др.) уходят в смазочный материал, в результате поверхность бронзы обогащается атомами меди. После ухода атомов легирующих элементов с поверхности бронзы деформация ее при трении вызывает диффузный приток новых атомов легирующих элементов к поверхности, которые затем уходят в смазочный материал. Таким образом, слой бронзы, который деформируется при трении, освобождается от легирующих элементов и становится в основном медным.

Глицерин является восстановителем оксида и закиси, поэтому поверхность трения медной пленки свободна от оксидных плёнок, она очень активна и способна к схватыванию со стальной поверхностью, так как имеет свободные связи. В результате стальная поверхность постепенно покрывается тонким слоем меди. Поскольку толщина слоя меди, образующегося на бронзовой поверхности, уменьшается вследствие его переноса на стальную поверхность, то происходит дальнейшее растворение бронзовой поверхности. Этот процесс продолжается до тех пор, пока на обеих поверхностях, стальной и бронзовой, не образуется слой меди толщиной 1...2 мкм. Пара трения сталь-бронза становится парой медь-медь.

Материал пленки находится в состоянии, подобном расплавленному. Она не способна к наклепу, имеет малые сдвиговые усилия, пориста. Плёнка в верхней части не имеет оксидов, способна к схваты-

ванию при трении. Частицы пленки могут переходить с одной поверхности трения на другую, т.е. схватываться без образования повреждений и увеличения сил трения.

Из приведенных на рисунке 4.5 схем контакта стальной и бронзовой деталей видно, что если при граничной смазке контакт сопряжённых поверхностей происходит только в отдельных точках, то при ИП он осуществляется через пластически деформируемый мягкий и тонкий слой меди. В результате площадь фактического контакта возрастает в десятки раз, а материал деталей трения испытывает лишь упругие деформации.

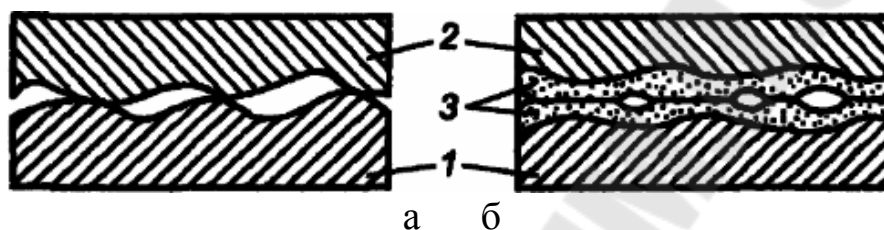


Рис. 4.5. Схема контакта деталей при граничной смазке (а) и ИП (б):
1 – сталь; 2 – бронза; 3 – пленка меди

При трении с граничной смазкой и трении без смазочного материала поверхности деталей всегда покрыты оксидными плёнками (рис. 4.6), которые предотвращают непосредственный контакт металлических поверхностей и их схватывание.

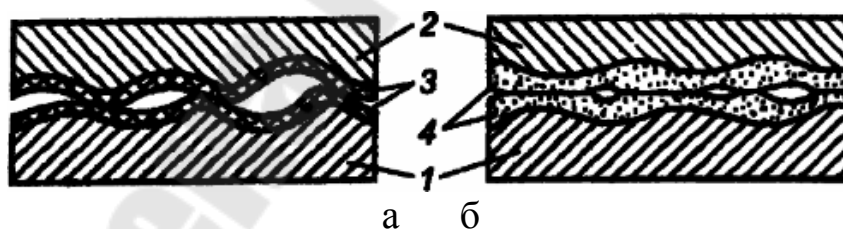


Рис. 4.6. Образование на поверхности контакта деталей при граничной смазке (а) и ИП (б): 1 – сталь; 2 – бронза; 3 – оксидные пленки; 4 – сервопитные пленки

При наличии на поверхности трения сервопитной плёнки продукты износа состоят из частиц меди; их поверхность пориста и весьма активна, поэтому частицы покрываются адсорбционным слоем поверхностно-активных веществ. Такие частицы (мицеллы) имеют электрический заряд и под действием его сосредотачиваются в зазорах (рис. 4.7). Кроме того, при ИП частицы износа могут переноситься с

одной поверхности трения на другую и схватываться, не вызывая повреждения этих поверхностей. Избирательный перенос является одним из наиболее эффективных средств защиты от водородного изнашивания. Образующаяся при ИП медная пленка снижает нагрузки до уровней, при которых образование водорода практически не происходит; кроме того, медная пленка является хорошей защитой от проникновения водорода в сталь (рис. 4.8).

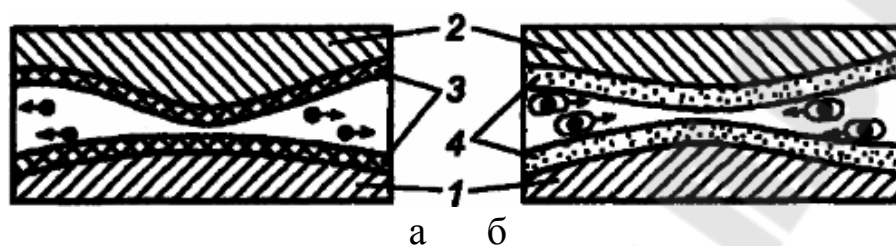


Рис. 4.7. Схема движения частиц износа в зоне контакта при граничной смазке (а) и ИП (б): 1 – сталь; 2 – бронза; 3 – оксидные пленки; 4 – сервовитные пленки

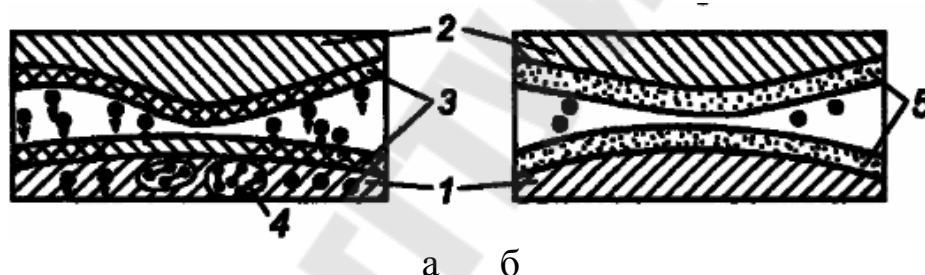


Рис. 4.8. Схемы движения водорода в зоне контакта при граничной смазке (а) и ИП (б): 1 – сталь; 2 – бронза; 3 – оксидные пленки; 4 – скопление ионов водорода и их молизация; 5 – сервовитные пленки

4.5. Усталостное разрушение

Усталость – процесс постепенного возникновения и развития трещин под влиянием многократных повторных силовых воздействий на металл.

Место, где зародилась трещина усталости, называется *фокусом излома*. Под действием переменной нагрузки трещина медленно распространяется в глубь тела детали, образуется зона усталостного развития излома. На изломе эта зона имеет ступеньки, рубцы. Когда уцелевшее сечение тела становится меньше допустимого, деталь разрушается.

Характер усталостного разрушения зависит от вида напряженного состояния, в связи с чем различают усталость при растяжении-сжатии, изгибе, кручении и контактную усталость.

Наиболее характерными деталями, подверженными усталостному разрушению, являются коленчатые валы, шатуны, шатунные болты, зубья шестерён, кольца подшипников, пружины, торсионные валы.

Чаще всего напряжения в деталях изменяются во времени по синусоидальному закону или могут быть представлены в виде суммы синусоидальных гармоник, что значительно облегчает расчеты.

Для общего случая синусоидальные циклы изменения напряжений σ во времени t в виде графиков приведены на рис. 4.9.

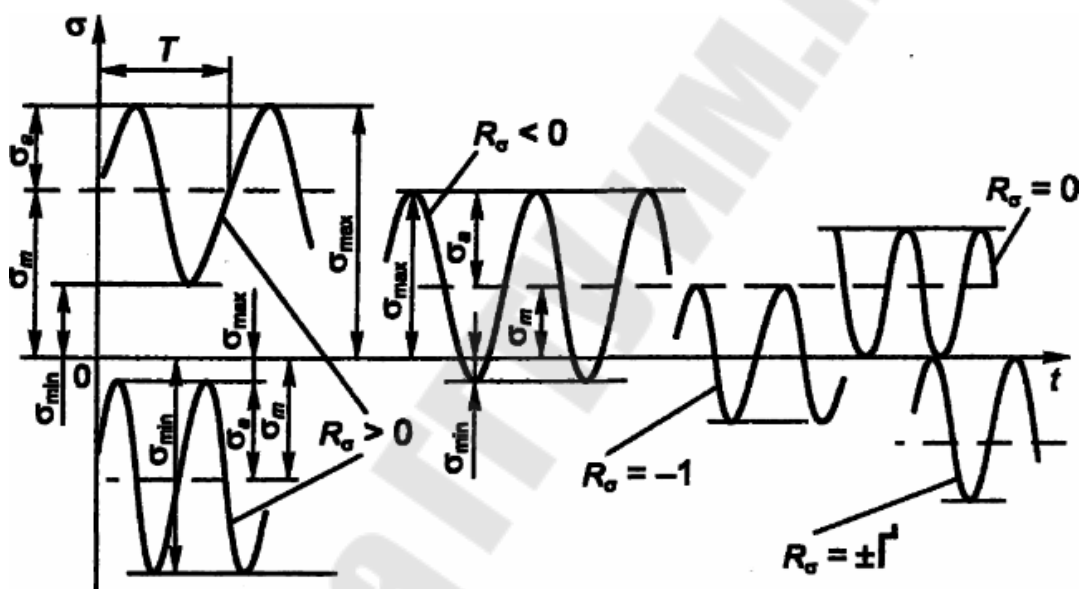


Рис. 4.9. Циклы изменения напряжений

Основными характеристиками цикла являются (ГОСТ 23207-78): σ_{\max} – максимальное напряжение цикла; σ_{\min} – минимальное напряжение цикла; σ_a – амплитуда напряжений цикла; $R_\sigma = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ – коэффициент асимметрии цикла напряжений; σ_m – среднее напряжение цикла напряжений; T – период цикла (время, в течение которого напряжение дважды принимает одно из предельных значений). Характерными для деталей машин являются циклы асимметричные знакопостоянные ($R_\sigma > 0$) и знакопеременные ($R_\sigma < 0$), симметричные ($R_\sigma = -1$) и отнулевые ($R_\sigma = 0$ и $R_\sigma = \pm \infty$).

Экспериментально установлено, что с увеличением напряжений число циклов, которое может выдержать образец до разрушения, по-

степенно уменьшается и для большинства черных металлов существует такое максимальное по абсолютному значению напряжения цикла σ_{\max} , при котором материал не разрушается при любом числе циклов. Такое напряжение называется *пределом выносливости* σ_R и обозначается: для симметричного цикла ($R_{\sigma} = -1$) – σ_{-1} , а для отнулевого ($R_{\sigma} = 0$) – σ_0 .

На рис. 4.10, а в системе координат « $\sigma_{\max} - N$ » нанесены экспериментальные точки, соответствующие предельным числам циклов напряжений N , выдержанных образцами до усталостного разрушения при различных уровнях напряжений ($\sigma_1 - \sigma_4$) Величину N называют циклической долговечностью. При напряжении σ_5 разрушение не возникло (отмечено стрелкой).

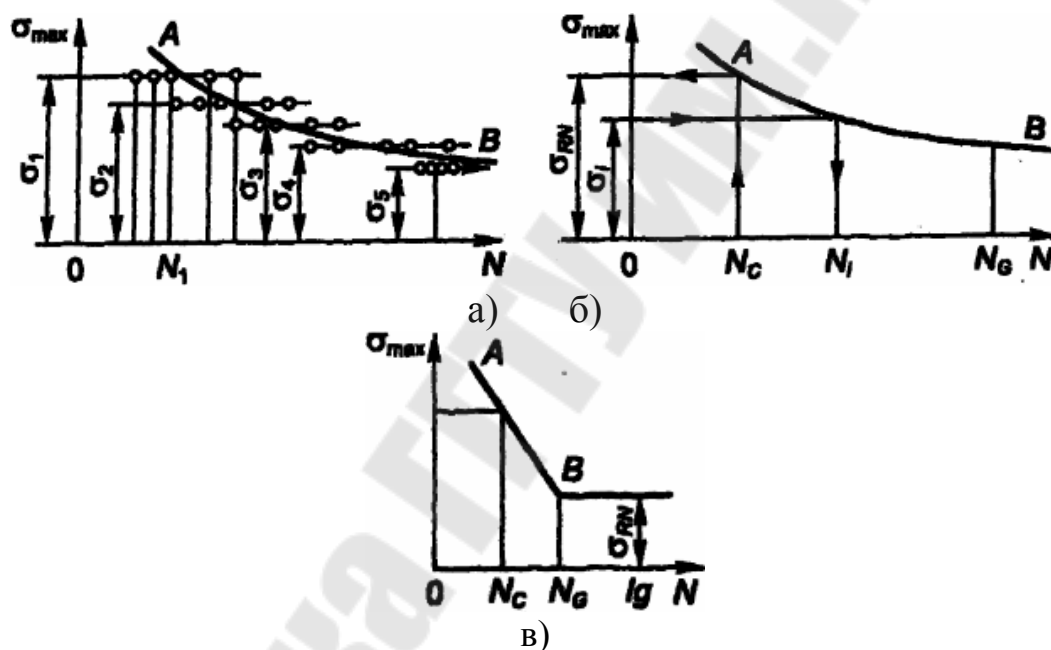


Рис. 4.10. Кривые усталости

На основании результатов усталостных испытаний строят кривую усталости. Кривая усталости – график, характеризующий зависимость между максимальными напряжениями (деформациями), или амплитудами цикла, и циклической долговечностью одинаковых образцов, построенный либо при равных для всех образцов средних напряжениях (деформациях, амплитудах) цикла, либо при одинаковом для всех образцов коэффициенте асимметрии цикла.

Результаты исследований показывают, что с ростом N $d\sigma/dN$ уменьшается по абсолютной величине и обычно кривая усталости имеет горизонтальную асимптоту. Значение N , соответствующее точ-

ке перелома кривой усталости, представляемой двумя прямыми линиями (точка B на рис. 4.10, б) обозначают N_G и принимают обычно за базу испытаний на усталость. База – это условное количество циклов, которое выдерживает образец до разрушения. Если при базовом количестве циклов образец не разрушается, то принято считать, что разрушение не произойдет при любом количестве циклов. Для черных металлов за базу принимают $N=3 \cdot 10^6 \dots 10 \cdot 10^6$, для цветных – $N=5 \cdot 10^7$. При испытаниях также различают малоцикловую $N \leq 10^6$ и многоцикловую $N > 10^6$ усталость.

Максимальное по абсолютному значению напряжение цикла, соответствующее задаваемой циклической долговечности $N_C < N_G$ называется пределом ограниченной выносливости и обозначается σ_{RN} (рис. 4.10, в). С удовлетворительной точностью участок АВ кривой усталости аппроксимируется зависимостью:

$$\sigma_{RN}^m \cdot N_C = const, \quad (4.3)$$

или

$$\sigma_i^m \cdot N_i = const, \quad (4.4)$$

где σ – заданный уровень напряжения; m – показатель степени.

По кривой усталости при заданном значении N_C определяют σ_{RN} , а при заданном уровне напряжения σ_i – N_i (рис. 4.10, б). Поэтому наклонный участок АВ представляется уравнением (4.3) или (4.4).

Показатель степени m зависит от вида напряженного состояния, формы детали, механических характеристик материала, способа термической обработки и равен обычно 6...9. При таких значениях m снижение σ_i при испытаниях связано с резким увеличением N_i . Для получения компактного графика используют логарифмическую шкалу по оси абсцисс. Широко применяют логарифмические шкалы и по обеим осям координат, при этом наклонный участок кривой усталости является прямой линией (рис. 4.10, в).

Предел выносливости является не только характеристикой свойств материала, как, например, модуль упругости, он зависит от метода испытаний, конструкции, размеров и состояния поверхности образца. В настоящее время отсутствует единая теория, объясняющая явление усталостного разрушения металла. Существует несколько гипотез: упрочнения и разупрочнения (И.А.Одинга), статистическая

теория прочности Вейбулла и Н.Н.Афанасьева, эффект Ребиндера и др.

Усталостная прочность зависит от различных факторов.

Концентрация напряжений вызывается следующими группами параметров:

- геометрическими (надрезы, отверстия, выточки, канавки, резьба, места сопряжения галтелями, в которых резко изменяется поперечное сечение детали, и др.);
- технологическими (наличие дефектов на поверхности детали, вызванных механической обработкой);
- металлургическими (присутствие в металле вторичных фаз, включений внутренних дефектов, пор, трещин и т.д.);
- эксплуатационными (приложение сосредоточенных сил, например контактные напряжения в зубьях зубчатых колес, подшипниках и т.д.).

В местах наличия концентратора напряжений появляются значительные по величине местные напряжения (рис. 4.11), район распространения этих напряжений невелик, поэтому они называются местными. Закономерность появления и распределения местных напряжений объясняется сгущением траекторий напряжений при их дифракции в районе концентратора (рис. 4.11).

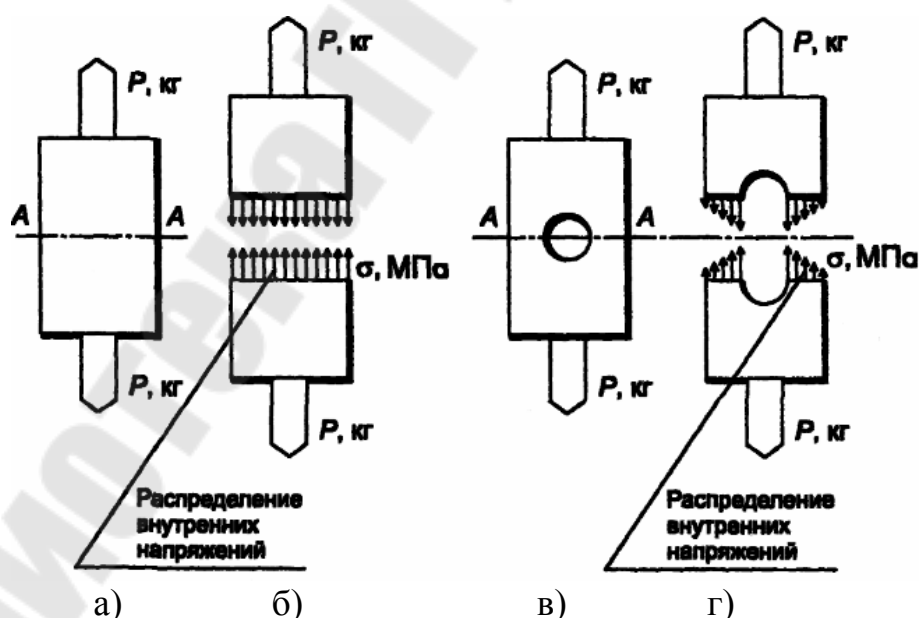


Рис. 4.11. Влияние концентратора напряжений на изменение эпюры напряжений: а, б – без концентратора напряжений; в, г – с концентратором

Место концентрации напряжений наибольшей величины зависит от конфигурации концентратора, способа приложения внешней нагрузки и других условий, влияющих на распределение напряжений. Местные напряжения меняют нормальную эпюру распределения напряжений в местах наличия концентратора (рис. 3.11).

Отношение наибольшего напряжения в районе концентрации (σ_{\max} или τ_{\max}) к среднему номинальному напряжению (σ_H или τ_H) называется *коэффициентом концентрации напряжений*.

Величина коэффициента концентрации напряжений тем меньше, чем лучше обтекаемость концентратора, и наоборот.

Различные материалы по-разному чувствительны к концентраторам напряжений.

Различают теоретический (α_K) и действительный (β_K) коэффициенты концентрации напряжений.

Теоретический коэффициент концентрации напряжений учитывает зависимость величины местных напряжений от геометрических форм и размеров концентратора. Вычисляется α_K методами теории упругости.

Действительный коэффициент концентрации напряжений учитывает влияние на величину местных напряжений и свойств самого материала.

Различие между коэффициентами концентрации характеризуется показателем чувствительности материала к надрезам (q):

$$q = \frac{(\beta_K - 1)}{(\alpha_K - 1)}, \quad (4.5)$$

Тогда

$$\beta_K = 1 + q(\alpha_K - 1). \quad (4.6)$$

Точное определение показателя чувствительности затруднительно. На практике пользуются его приближенным значением. Следовательно, и β_K рассчитать можно приближенно. Точное значение β_K определяется экспериментально.

При проектировании стальных конструкций, работающих в условиях циклических нагрузок, необходимо стремиться к исключению концентраторов напряжений в данных конструкциях. Если по конструктивным соображениям этого избежать нельзя, то необходимо по

возможности снизить коэффициент концентрации. Для этого изменяют форму концентратора в сторону его лучшей обтекаемости: сглаживают углы, увеличивают радиусы закруглений, предусматривают более плавные переходы сечений, улучшают качество обрабатываемой поверхности, избегают внутренних дефектов материала и т.п.

Следует обратить внимание на явление наложения концентраторов напряжений (например, царапины, риски на поверхности галтелей, шеек валов, канавок; резьба с грубо шероховатой поверхностью и т.п.). Одновременное наличие в одном месте нескольких концентраторов напряжений значительно повышает коэффициент их концентрации и, следовательно, снижает циклическую прочность конструкции.

Рекомендуется избегать локального увеличения жёсткости конструкции, также приводящего к концентрации напряжений.

Частота нагружения. Зависимость усталостной прочности от частоты нагружения обуславливается действием двух противоположных по своему влиянию факторов: временного, т.е. времени действия нагрузки в течение цикла (длительности цикла); температурного – повышения температуры металла при увеличении частоты нагружения.

При увеличении частоты нагружения усталостная прочность повышается, так как сокращается продолжительность действия нагрузки и уменьшается относительная повреждаемость металла. Одновременно увеличение частоты нагружения приводит к повышению температуры материала детали, причём тем в большей степени, чем ниже теплопроводность данного материала. При росте температуры усталостная прочность снижается.

Критическая частота нагружения, при достижении которой температурный фактор преобладает над временным, зависит от физических свойств материала и прежде всего от его теплопроводности.

Химический состав материала. Усталостная прочность, так же как и статическая, зависит от химического состава данного материала. Легирование, приводящее к увеличению предела прочности, способствует и росту циклической прочности. При легировании низко- и среднеуглеродистых сталей марганцем, никелем, хромом, молибденом, ванадием и другими элементами усталостная прочность возрастает.

Увеличение содержания углерода в стали способствует повышению усталостной прочности только у низко- и среднеуглеродистых сталей. Повышение содержания углерода в углеродистых сталях при-

водит к снижению усталостной прочности. Так, предел выносливости стали У7 ниже, чем у стали 45, а у стали У12 меньше, чем у стали У8. У высоколегированных сталей также наблюдается снижение предела выносливости с увеличением содержания углерода.

Масштабный фактор. Под масштабным фактором понимают влияние на механические свойства и прочность деталей изменения только размеров при соблюдении подобия действия всех остальных факторов (химического состава и структуры материала, качества поверхности, концентраторов напряжений и др.).

С увеличением размеров образцов или деталей происходит снижение их усталостной прочности. Снижение предела выносливости с ростом размеров носит затухающий характер. Влияние масштабного фактора на предел выносливости усиливается с повышением прочностных характеристик и ростом структурной неоднородности материала образца или детали. Влияние размера образца (детали) на величину предела выносливости характеризуется коэффициентом Ψ :

$$\Psi = \frac{\sigma_{-1}}{(\sigma_{-1})_0}.$$

где σ_{-1} – предел выносливости конструкции абсолютных (действительных) размеров; $(\sigma_{-1})_0$ – предел выносливости геометрически подобной ей лабораторного образца из того же материала.

Тогда

$$\sigma_{-1} = \Psi \cdot (\sigma_{-1})_0.$$

Величина масштабного коэффициента всегда меньше единицы. Для конструкций из одного и того же материала она не является постоянной и изменяется в зависимости от формы конструкции, вида напряженного состояния, качества поверхности детали или элемента конструкции и т.д.

При рассмотрении влияния масштабного фактора на прочность деталей необходимо считаться с двумя факторами, одним из которых является собственно масштабный фактор, другим – масштабный эффект, т.е. проявление первого фактора.

Для объяснения влияния масштабного фактора выдвинуто ряд гипотез и теорий. В частности, в соответствии со статистической теорией Н.Н. Афанасьева, вероятность наличия максимально слабых не-

однородностей в микрообъемах материала и, особенно, на поверхности образцов или деталей с увеличением их размеров возрастает. Особенно интенсивно эта вероятность растет при увеличении исходных размеров до 30...60 мм, затем интенсивно падает, и если исходные размеры превышают 100...200 мм, то начинает асимптотически приближаться к максимально вероятной неоднородности для данного материала. В соответствии с этим в случае деталей малых размеров наблюдается существенное влияние масштабного фактора на снижение их механических свойств и прочности. Интенсивность действия данного фактора на детали больших размеров снижается, приближаясь к некоторой определенной величине.

Жидкие среды. На усталостную прочность деталей и элементов конструкций существенное влияние оказывает среда, в которой они работают. Наиболее часто возникает адсорбционная и коррозионная усталость.

В случае адсорбционной усталости все явления проходят в микрообъемах, меньше зерна материала, а в случае коррозионной усталости эти явления на последнем этапе своего развития носят микроскопический характер, подобно явлениям, происходящим при наличии концентрации напряжений.

Коррозионно-усталостные трещины являются концентраторами напряжений, однако их эффективность из-за большого числа трещин снижается. Между разрушениями, возникающими от воздействия обычных концентраторов и от коррозионно-усталостных трещин, существует различие: в первом случае разрушение происходит в результате приложений внешних нагрузок, а во втором случае к этому добавляется воздействие физико-химических процессов.

4.6. Коррозионное разрушение

Процесс коррозии – это разрушение металлов вследствие их химического или электрохимического взаимодействия с окружающей средой. Причина коррозии заключается в термодинамической неустойчивости металлов в окружающей (рабочей) среде. Коррозия приводит к значительным убыткам металлического фонда – деталей машин, приборов, сооружений, средств транспорта и т.д.

Простейший пример коррозии – равномерное поверхностное растворение, уменьшающее толщину материала, но не влияющее на его физико-химические и механические свойства. Однако часто кор-

розия на различных участках поверхности оказывается неравномерной. В случае сильного локального разрушения возникают глубокие точечные поражения, приводящие к перфорации стенок и выходу технических устройств из строя. Очень часто преимущественному разрушению подвергаются границы зерен хромистых и хромоникелевых сталей: связь между ними ослабевает, что резко ухудшает механические свойства оборудования и может привести к его растрескиванию. Коррозия металлов может носить ножевой характер – вдоль сварных швов образуются узкие глубокие канавки. Если металлические детали находятся в напряжённом состоянии в коррозионной среде, то может происходить коррозионное растрескивание, которому подвержены практически все металлы и сплавы. При динамических нагрузках происходит коррозионно-усталостное или кавитационное разрушения.

В некоторых случаях воздействие коррозионной среды приводит к значительным изменениям состава и свойств материала, происходит избирательная коррозия сплава с его последующим разрушением. Из-за возможного отложения продуктов коррозии ухудшается проводимость трубопроводов, уменьшается теплопроводность поверхностей теплообмена. По причине образования коррозии может происходить загрязнение различной продукции, бактериальное заражение пищевых продуктов, питьевой воды.

Характер коррозионного разрушения зависит от температуры, состава и скорости потока среды, давления, облучения, а также от конструктивных особенностей, включая узлы трения, узкие зазоры, щели, наличие концентраторов напряжений. Появляются новые, особо агрессивные среды, повышаются температуры, давления и механические нагрузки, при которых работают детали. Поэтому требования к коррозионной стойкости металлических деталей, предъявляемые современной техникой, становятся все более высокими. Необходимы новые достижения в области коррозионной защиты металлов, включая разработку коррозионно-стойких конструкционных сплавов, упрочнение поверхностных слоёв металлических деталей, применение и подбор эффективных ингибиторов, разработку коррозионно-стойких защитных покрытий.

Износостойкость, усталостная прочность и другие эксплуатационные характеристики деталей машин зависят не только от химического состава и структуры материала, из которого изготовлены

детали, но также от качества поверхностного слоя деталей, что в конечном итоге определяется технологией их изготовления

4.7. Влияние физико-механических свойств поверхности

На процессы трения и изнашивания оказывают влияние такие физико-механические свойства поверхностного слоя, как твёрдость и остаточные напряжения, глубина и степень деформационного упрочнения, структурное состояние металла.

Предварительное упрочнение (повышение твёрдости) металла поверхностного слоя способствует повышению износостойкости детали. При этом уменьшается истирание и смятие поверхностей при непосредственном контакте, а также взаимное внедрение, возникающее при механическом и молекулярном взаимодействии. Повышение твёрдости препятствует развитию совместной пластической деформации металлов трущихся деталей, способствующей схватыванию, являющемуся наиболее интенсивным видом изнашивания.

Предварительный наклёп активизирует поверхностный слой, что приводит к росту скоростей диффузии и химической реакции. При этом с большей скоростью в поверхностном слое образуются твёрдые химические соединения металла с кислородом, образуя химические соединения, характерные для окислительного изнашивания, протекающего с меньшей интенсивностью.

Наличие в поверхностном слое наклёпа, снижающего начальный износ, оказывает существенное влияние на общий износ деталей в процессе эксплуатации.

Важно при этом отметить, что положительное влияние предварительного наклёпа на износостойкость деталей проявляется как в условиях жидкостного трения, так и в условиях сухого.

В период приработки на трущихся поверхностях формируется не только оптимальная шероховатость, но и оптимальная микротвёрдость металла поверхностного слоя.

В тех случаях, когда микротвёрдость поверхностного слоя до начала процесса изнашивания невелика, а изнашивание происходит при больших нагрузках, в процессе приработки микротвёрдость увеличивается и продолжительность приработки определяется интенсивностью ее роста (рис. 4.12). Если же микротвёрдость металла поверхностного слоя до изнашивания достаточно велика, то продолжительность приработки зависит от скорости изнашивания и пластического

смятия неровностей поверхности. При этом за счёт изнашивания наиболее упрочнённого поверхностного слоя может произойти снижение микротвёрдости до некоторого оптимального значения, соответствующего пределу текучести, при котором обеспечивается равенство несущей способности поверхности и внешней нагрузки. В последнем случае достижение оптимальной микротвёрдости непосредственно не связано с периодом приработки и может произойти до его окончания или в зоне установившегося изнашивания.

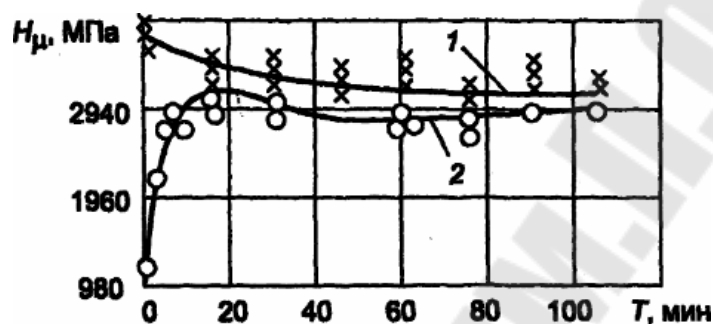


Рис. 4.12. Изменение микротвёрдости образцов из стали 20 в процессе изнашивания

Положительное влияние наклёпа на износостойкость трущихся поверхностей проявляется до определённой степени первоначального наклёпа. Если при предварительной обработке трущейся поверхности степень пластической деформации поверхностного слоя превосходит определённое для данного металла значение, то в металле начинается процесс его разрыхления (разрыв межуатомных связей по плоскости скольжения и субмикроскопическое нарушение сплошности металла), происходящий одновременно с продолжающимся процессом упрочнения.

При дальнейшем увеличении нагружения переупрочнённые и охрупченные зоны металла отслаиваются от его основной массы, начинается шелушение и ускоренный износ металла. Таким образом, зависимость износостойкости от глубины и степени наклёпа поверхностного слоя немонотонная: максимальное снижение износа достигается после обработки с определёнными (оптимальными) значениями степени (U_H) и глубины наклёпа h_H .

Поэтому упрочнение металла поверхностного слоя в процессе механической обработки деталей и при специальных упрочняющих операциях (обкатка роликами и шариками, дробеструйный наклёп и др.) следует производить при строго регламентированном наклёпе,

что предотвращает возникновение перенаклепа. Необходимо также учитывать, что наклёп – явление обратимое, т.е. при повышении температуры возможно уменьшение или полное снятие наклёпа в металле поверхностного слоя. В связи с этим наличие наклёпа при определённых условиях изнашивания не эффективно (например, сухое трение скольжения при высоких скоростях).

При выполнении упрочняющей обработки в поверхностном слое детали возникает не только упрочнение (повышение твёрдости), но и происходит образование остаточных напряжений. В частности, при механической обработке пластическая деформация способствует образованию остаточных напряжений сжатия.

При трении и изнашивании в металле поверхностного слоя имеют место значительные пластические деформации, вызывающие интенсивный наклёп и большие остаточные напряжения сжатия.

В начальный период трения деталей в их поверхностном слое остаточные напряжения, созданные предшествующей обработкой и являющиеся по своей природе упругими, снимаются под действием протекающих пластических деформаций независимо от их знака.

Одновременно в поверхностном слое в результате трения возникают остаточные напряжения сжатия, которые зависят от условий трения и пластических свойств трущихся металлов и не зависят от величины и знака остаточных напряжений, созданных предшествующей обработкой и сохранившихся в поверхностном слое до начала трения.

В процессе трения и изнашивания в металле поверхностного слоя протекает интенсивная пластическая деформация, которая не может быть создана никакой механической обработкой. Совершенно естественно, что пластическая деформация полностью снимает остаточные напряжения в поверхностном слое, сохранившиеся в нем до изнашивания, поэтому такие напряжения не успевают проявить своего влияния на изнашивание деталей.

Напряжённое состояние всего сечения детали (например, растягивающие внутренние напряжения в стенках втулки, напрессованной на другую деталь) может оказать своё воздействие на характер и интенсивность изнашивания. Возможным является влияние напряжённого состояния при изнашивании в условиях питтинга, при котором большое значение имеют явления усталости металла.

Усталостная прочность деталей машин зависит от упрочнения металла поверхностного слоя. Упрочнение металла до определенных пределов уменьшает амплитуду циклической пластической деформа-

ции и предотвращает возникновение субмикроскопических нарушений сплошности (разрыхления), порождающих развитие усталостных трещин.

Кроме этого, создание упрочненного наклепанного поверхностного слоя препятствует росту существующих и возникновению новых усталостных трещин. Такой слой может значительно нейтрализовать вредное влияние наружных дефектов и шероховатости поверхности.

У деталей с твёрдым упрочнённым слоем после циклических нагружений, из-за которых в металле возникают напряжения, превышающие предел выносливости, усталостные трещины зарождаются не в упрочнённом слое детали, а в ее глубине. Образование подобных трещин под упрочнённым слоем и их дальнейшее увеличение происходят при более высоких напряжениях и большем числе циклов нагружения, чем в условиях отсутствия упрочнения.

Влияние перечисленных причин приводит к заметному повышению усталостной прочности деталей машин в результате упрочнения их поверхностного слоя.

Как показывают результаты многочисленных исследований, например при наклёпе металла поверхностного слоя, повышение усталостной прочности деталей машин, работающих в условиях нормальной комнатной температуры, может достигнуть 25...30 %.

Знак и величина остаточных напряжений также оказывают большое влияние на усталостную прочность деталей машин. Остаточные сжимающие напряжения резко повышают усталостную прочность деталей, поэтому способы и режимы обработки, обеспечивающие формирование остаточных напряжений, широко применяются в практике.

Остаточные напряжения сжатия в большей мере повышают предел выносливости, чем снижают его такие же по величине остаточные напряжения растяжения. Для сталей повышенной твёрдости повышение предела выносливости благодаря действию сжимающих напряжений достигает 50 %, а снижение его под действием растягивающих – 30 %.

Особенно велико влияние остаточных напряжений на предел выносливости стали, когда разница в прочности стали при растяжении и сжатии большая. Поэтому предел выносливости твёрдых сталей зависит от величины и знака остаточных напряжений особенно сильно, в то время как у мягких и пластичных сталей эта зависимость проявляется в меньшей степени.

При высокой температуре нагрева и циклическом нагружении остаточные макронапряжения независимо от их значения и знака мало или вообще не оказывают влияния на сопротивление усталости. Это обусловлено прежде всего быстрой релаксацией остаточных напряжений при нагреве деталей.

Теплота, выделяющаяся в зоне резания при различных методах механической обработки в определённых условиях (напряжённые режимы резания, притупление режущего инструмента и засаливание абразивного круга чрезмерно высокой твёрдости, недостаточное охлаждение и др.), вызывает структурные изменения металла поверхностного слоя. При обработке металлов, воспринимающих закалку, может произойти частичная закалка металла поверхностного слоя, а при обработке закалённых металлов – отпуск различной степени.

Структурные изменения металла поверхностного слоя при его механической обработке и, в частности, ожога шлифуемой поверхности являются серьёзной причиной снижения качества деталей.

Участки мягкого металла имеют пониженную износостойкость. Обычно в зонах отпущенного металла, имеющего меньший удельный объем, развиваются остаточные напряжения растяжения, снижающие усталостную прочность деталей. При этом на границах участков с изменённой структурой часто образуются шлифовочные трещины, являющиеся очагами усталостных разрушений.

На усталостную прочность оказывают влияние размер зерна и границы зёрен металла детали. При внутризеренном разрушении границы зёрен играют роль барьеров, препятствующих распространению трещин усталости. Поэтому мелкозернистая структура должна оказывать более высокое сопротивление усталости, чем крупнозернистая. В крупнозернистом металле трещина распространяется на большее расстояние (пропорционально размеру зерна), чем в мелкозернистом.

Однако если термическая обработка, приводящая к измельчению зерна, ослабляет прочность границ зёрен, то распространение трещин через границы зёрен облегчается и преимущества мелкозернистой структуры по сравнению с крупнозернистой не наблюдаются.

Состояние поверхности металлических материалов, кристаллическая структура и наличие различных структурных дефектов сказываются на процессах коррозии металлов.

Установлено, что чем выше плотность упаковки кристаллической структуры, тем ниже скорость коррозии.

С увеличением шероховатости поверхности коррозионная стойкость металлов снижается, так как облегчается смачивание и увеличивается число активных мест. На гладкой поверхности после тонкой обработки (шлифовки, полировки) формируется более плотная и однородная плёнка оксидов, защищающих металл от коррозии. При образовании плёнок на поверхности имеет значение соответствие кристаллографической структуры металла и плёнки. Скорость коррозии максимальна на дефектах структуры, переходных областях и границах зёрен.

Величина зерна оказывает незначительное влияние на скорость коррозии. Только для случая межкристаллитной коррозии увеличение размера зерна увеличивает скорость коррозии, так как общая протяжённость границ зёрен, где идёт локальное разрушение, становится меньше.

Деформация металла в процессе нагрева может вызывать нарушение сплошности плёнок и увеличивать по этой причине скорость коррозии.

Наиболее опасным видом коррозии является *коррозионное растрескивание* при одновременном воздействии коррозионной среды и растягивающих внешних или внутренних напряжений. Установлено, что внутренние напряжения растяжения понижают, а сжатия – повышают сопротивление коррозионному растрескиванию сплавов. Причинами, вызывающими внутренние напряжения при механической обработке, являются пластическая деформация, нагрев и связанные с этим фазовые превращения в поверхностных слоях, а также наводороживание сталей, происходящее в кислых средах. Коррозионное растрескивание характеризуется образованием межкристаллитных, транскристаллитных и смешанных трещин с разветвлениями, направление которых перпендикулярно растягивающим напряжениям.

Поэтому создание в поверхностных слоях металлов сжимающих напряжений путём обдувки дробью или обкатки роликом, поверхностное упрочнение токами высокой частоты или дробеструйным наклёпом, применение защитных покрытий увеличивает коррозионную стойкость сплавов.

При поверхностном наклёпе или дробеструйной обработке на поверхности металла возникают напряжения сжатия, которые эффективно предотвращают коррозионное растрескивание, пока сжатые слои остаются сплошными и не повреждаются в результате общей коррозии.

4.8. Микрогеометрия

В процессе трения шероховатость поверхности изменяется, стремясь к некоторому стабильному значению. Исходная шероховатая поверхность будет выглаживаться, а исходная гладкая становится шероховатой. При одинаковых внешних условиях трения одноименных материалов после приработки в течение нескольких часов обе шероховатости будут одинаковыми, приняв так называемое значение *равновесной шероховатости*.

Как высокие и острые, так и весьма пологие микронеровности под влиянием сил трения стремятся к некоторому промежуточному значению. Очевидным является то, что высокие острые микронеровности сглаживаются под влиянием напряжений, возникающих на выступах. Причины, приводящие к разрушению гладких поверхностей, имеющих пологие микронеровности, требует дополнительного пояснения.

Невозможность существования гладких поверхностей базируется на гипотезе «плёночного голодания». Эта гипотеза исходит из необходимости наличия защитной плёнки на поверхности трения и учитывает время процессов формирования защитной пленки и ее истирания, зависящее от шероховатости. Образование пленки происходит или вследствие осаждения на поверхности веществ из окружающей среды, или вследствие разрыхления поверхностного слоя твердого тела. Пленка извне может образовываться за счет жидкой или газообразной фазы. При этом образование пленки на гладких поверхностях затруднено.

Малая скорость восстановления пленки и быстрое ее изнашивание на гладких поверхностях обуславливает невозможность существования поверхностей, имеющих высокую гладкость, т.е. большие пятна контакта. Процесс формирования равновесной шероховатости схематически изображён на рис. 4.13. Слева показан контакт идеально гладких поверхностей. В процессе трения возникающие микрозадиры постепенно сглаживаются и неровности доходят до равновесной конфигурации. Очень высокие и острые выступы, изображенные на правой части графика, постепенно сглаживаются и также приходят к равновесной шероховатости.

Если в последнем случае (правая часть кривой) протекание процесса зависит от механических свойств трущихся тел (твердости, предела текучести), то нарушение защитной роли пленки (левая часть

кривой) зависит от молекулярных, атомарных характеристик, поверхностной энергии, химического сходства, а главное от газового или жидкостного голодания, возникающих вследствие сужения зазора.

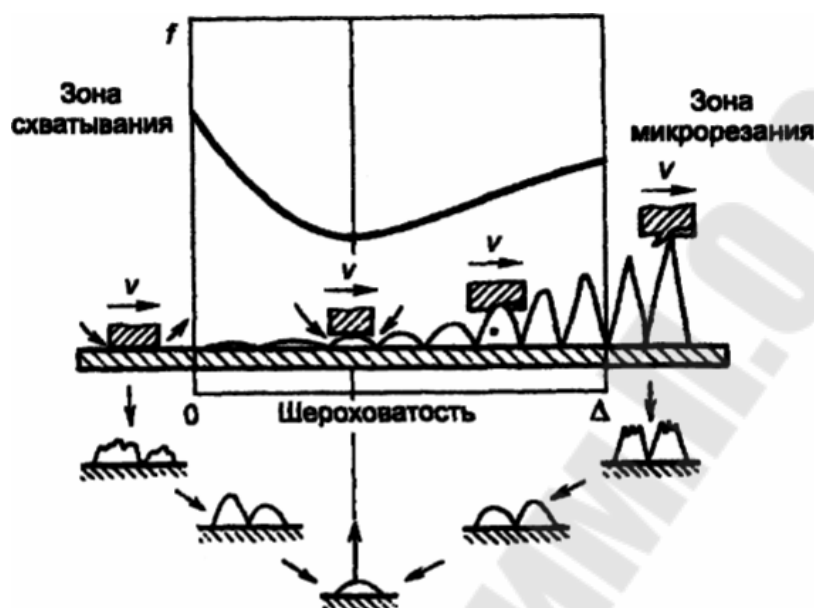


Рис.4.13. Схема формирования равновесной шероховатости

Исходная шероховатость (технологический микрорельеф), определяемая технологией изготовления деталей, влияет на износостойкость сопряжения в основном только через приработку. Под приработкой понимается процесс изменения микрогеометрии поверхности трения и физико-механических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения, обычно проявляющийся при постоянных внешних условиях в уменьшении работы трения, температуры и интенсивности изнашивания.

В процессе приработки микронеровности технологического рельефа подвергаются воздействию нормальных и касательных напряжений. Интенсивным воздействиям будут подвержены наиболее высокие и острые микронеровности, которые за счёт больших напряжений будут либо срезаться, либо пластически деформироваться. Пологие, гладкие микронеровности также будут испытывать интенсивное воздействие при трении за счет большой адгезии и «пленочного голодания», что приведёт к значительному изменению их геометрического очертания. Поэтому в совокупности микронеровностей, имеющих различную высоту и радиус закругления, в более благоприятных условиях окажутся промежуточные по своим размерам микронеровности. Они будут превалирующими на приработанной поверхности.

Равновесная шероховатость для установившегося процесса соответствует минимальному значению сил трения при прочих неизменных условиях. В процессе приработки исходный (технологический) микрорельеф преобразуется в эксплуатационный (рис. 4.14). Повышенному начальному износу в период приработки в некоторых случаях способствует возникновение в точках контакта высоких мгновенных температур и срыв оксидной пленки, покрывающей металла, что сопровождается молекулярным сцеплением трущихся металлов и образованием узлов схватывания.

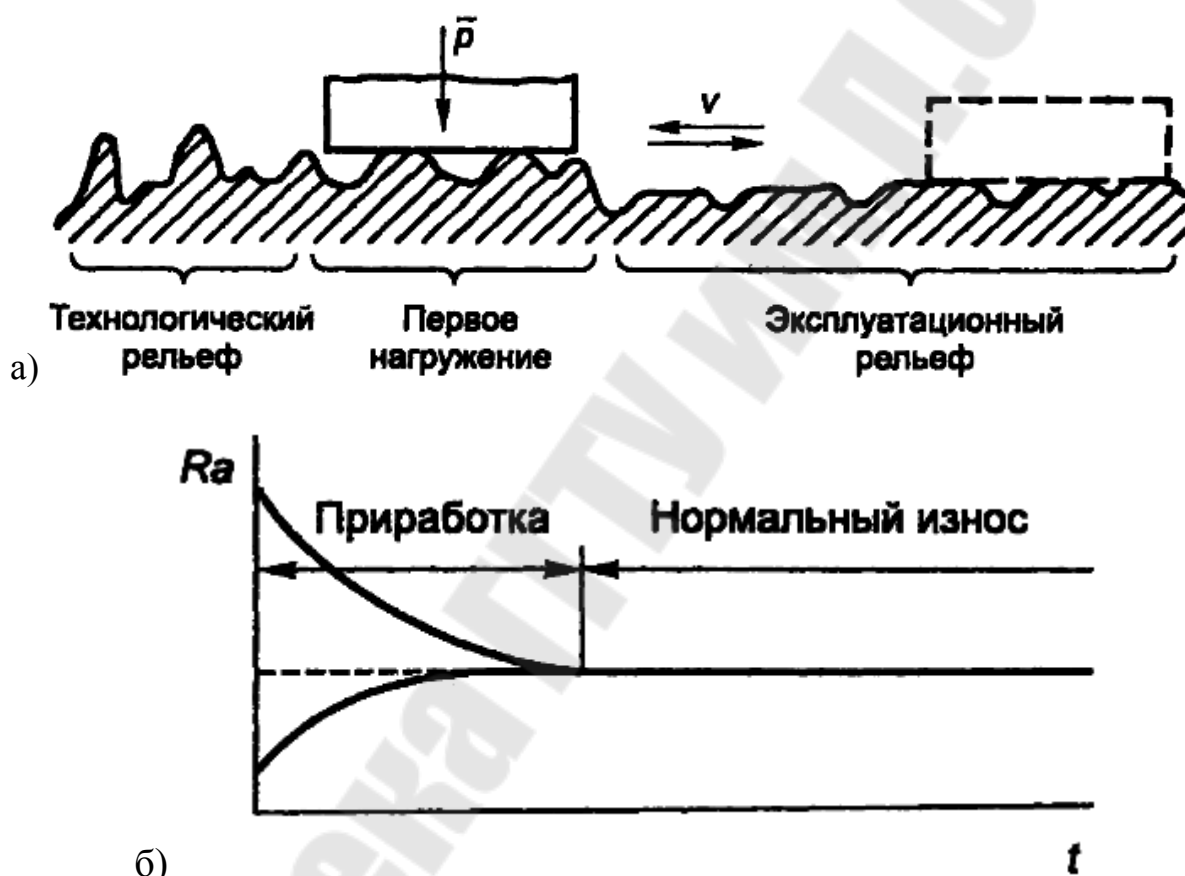


Рис. 4.14. Схема трансформации технологического рельефа поверхности в эксплуатационный

Рассматривая дифференцирование характеристики шероховатости поверхности, необходимо отметить, что высота микронеровностей поверхности оказывает сложное влияние на интенсивность изнашивания. При очень малых значениях Rz создаются благоприятные условия для схватывания и интенсивного молекулярно-механического взаимодействия. С увеличением высоты микронеровностей доля молекулярной составляющей силы трения убывает, но при этом возрастает

тает механическая составляющая. В результате с увеличением Rz увеличивается износ поверхности. При больших значениях высот микронеровностей и относительно малой твёрдости противолежащей поверхности изнашивание может принять абразивный характер.

Шероховатость и волнистость поверхности для процесса изнашивания не ограничиваются влиянием высоты неровностей и размеров фактической поверхности контакта, а связаны также с шагом и формой неровностей. На рис. 4.15, а представлены формы неровностей двух образцов, имеющих одинаковые размеры фактической поверхности контакта, а на рис. 4.15, б – кривые износа этих образцов.

Приведенные данные показывают, что в условиях проведенного опыта тонкие и многочисленные неровности обеспечивают большую износостойкость, чем крупные неровности большого шага. Через $n=160000$ двойных ходов износ поверхности с неровностями малого шага достиг 40 мкм, в то время как износ поверхности с неровностями большого шага достиг 60 мкм. Кроме того, у образца с неровностями большого шага к моменту окончания опыта не закончился период приработки.

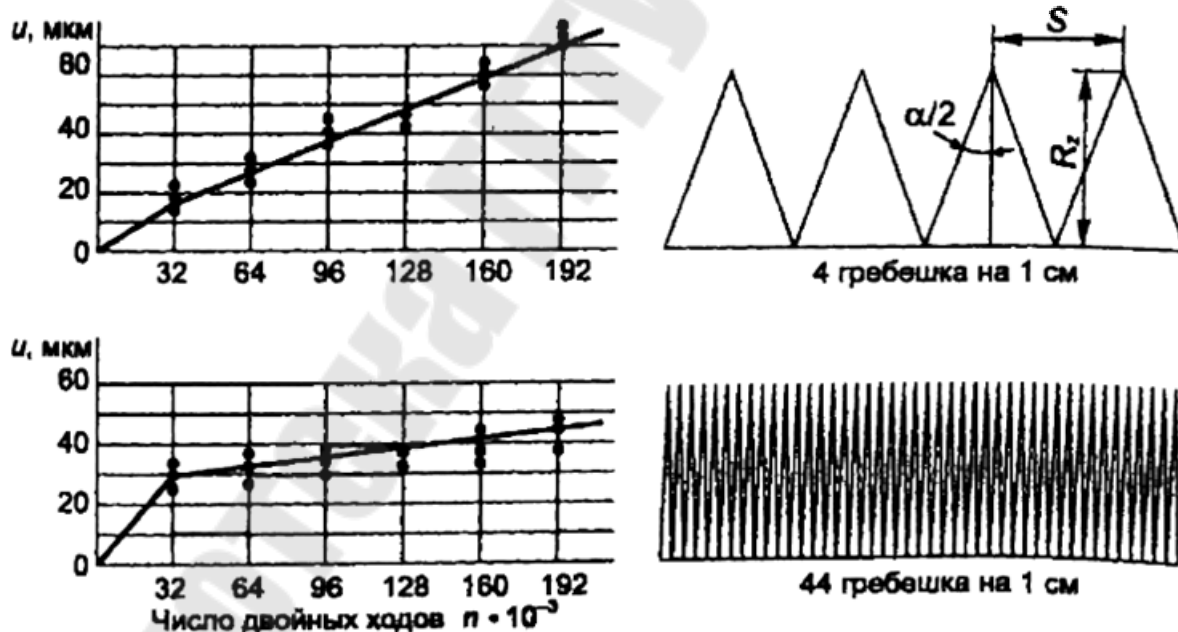


Рис. 4.15. Кривые износа (а) поверхностей с различной формой неровностей (б) при одинаковых высоте неровностей и форме кривых опорной поверхности

Получение при обработке поверхностей трения микронеровности с высотой R_{max} , равной «эксплуатационной», не является надеж-

ным показателем оптимальности микрогеометрии, обеспечивающей минимальный износ в период приработки. Под термином «оптимальная микрогеометрия» необходимо понимать оптимальные значения всех характеристик микрогеометрии или какого-то комплексного выражения, наиболее полно отражающего свойства шероховатой поверхности и ее влияния на износостойкость. В качестве такого выражения целесообразно использовать комплексную безразмерную характеристику шероховатости несущей поверхности:

$$\Delta = \frac{R_{\max}}{\rho \cdot b^{1/\gamma}},$$

где R_{\max} – наибольшая высота неровностей профиля, мкм;

ρ – радиус закругления вершин неровностей, мкм;

b и γ – параметры кривой опорной поверхности.

В процессе приработки, несмотря на значительное колебание отдельных характеристик микрогеометрии, имеет место монотонное уменьшение комплекса Δ .

Исходя из этого, можно сделать предположение о том, что отклонение одной из характеристик от общей закономерности изменения должно компенсироваться изменением других характеристик, входящих в безразмерный комплекс, а в итоге общая закономерность изменения Δ остаётся постоянной для конкретного метода обработки.

Для прогнозирования изменения микрогеометрии в процессе приработки целесообразно использовать зависимость:

$$\Delta = \Delta_{\text{исх}} - k \left(1 - \frac{1}{e^{cx}} \right),$$

где $\Delta_{\text{исх}}$ – значение безразмерного комплекса после окончательной обработки;

c – коэффициент, зависящий от качества поверхностного слоя, которое определяется технологическими методами обработки;

x – число циклов изнашивания N или путь трения S , км;

k – коэффициент, показывающий, насколько изменяется величина безразмерного комплекса от исходного состояния $\Delta_{\text{исх}}$ до эксплуатационного состояния «рабочего» микрорельефа $\Delta_{\text{эксн}}$. Он равен:

$$k = \Delta_{\text{исх}} - \Delta_{\text{эксн}} \quad (4.7)$$

Величина $\Delta_{эксн}$ определяется условиями изнашивания (скоростью, давлением, смазкой, материалом трущейся пары, ее физико-механическими свойствами и т.д.). В связи с этим коэффициент k связывает в уравнении (4.7) величину изменения безразмерного комплекса Δ с условиями процесса трения и изнашивания.

Величины этих коэффициентов для некоторых методов обработки и условий процесса изнашивания приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Значения коэффициентов $\Delta_{исх}$, Δ , C_N , C_S различных методов окончательной обработки

Коэффициент	Метод			
	Алмазное шлифование торцом круга	Притирка алмазными пастами	Накатывание (шариками, роликами)	Электро-механическая обработка (ЭМО)
$\Delta_{исх}$	$9,2 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$8,8 \cdot 10^{-3}$	$6,25 \cdot 10^{-3}$
Δ	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$4,55 \cdot 10^{-3}$
C_N	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
C_S	0,135	0,05	0,081	0,100

В данной таблице значения коэффициентов C_N приведены для определения Δ в зависимости от числа циклов N и C_S в зависимости от длины пути S , км.

Влияние направления микронеровностей на износостойкость неодинаково для различных условий трения и разных размеров микронеровностей. При жидкостном трении и малой высоте микронеровностей направление не влияет на износостойкость, однако при увеличении шероховатости более выгодным оказывается параллельное направление микронеровностей и скорости движения.

При граничном трении поверхностей с малыми микронеровностями, параллельном направлении микронеровностей и скорости движения возникающие схватывание и износ оказываются больше, чем при перпендикулярном направлении. Для поверхностей с большой шероховатостью, когда схватывание не происходит, параллельное направление микронеровностей даёт меньший износ.

Коэффициент трения тоже связан с направлением микронеровностей и их высотой. При сочетании поверхностей, имеющих одинаковое направление микронеровностей при их перпендикулярном на-

правлении к движению, коэффициент трения достигает наибольшего значения. При перпендикулярном направлении микронеровностей трущихся поверхностей или при их хаотичном расположении, что наблюдается при суперфинишировании, коэффициент трения минимален.

При рассмотрении влияния микрогеометрии на усталостную прочность деталей машин необходимо иметь в виду, что впадины микрорельефа являются концентраторами напряжений. С этой точки зрения особенно опасны глубокие впадины с малым радиусом закругления дна. Такие впадины играют роль мощнейших концентраторов напряжений, резко снижающих усталостную прочность.

РАЗДЕЛ 5. ВИДЫ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Изготавливаемые промышленностью машины, станки, приборы и аппараты, как правило, состоят из различных, определённым образом объединённых и взаимно связанных деталей, которые соединяются между собой различными способами. Соединение деталей обеспечивает их определённое взаимное положение в процессе работы. Различают разъёмные и неразъёмные соединения

5.1. Разъёмные соединения

Существует большая группа разъёмных соединений, в которых разъем осуществляется не с помощью резьбы, а посредством особых конструктивных условий сборки. К этой группе следует отнести в первую очередь шпоночные, штифтовые и шлицевые соединения.

Это стандартные способы соединения, в которых все конструктивные параметры, материалы, точность изготовления и условия эксплуатации, а также сборка полностью определены государственными стандартами.

В зависимости от назначения, как правило, осуществляется по одному из базовых размеров. При этом работоспособность соединения оценивается проверочными расчётами уже после конструктивной разработки соединений.

Если выбранное соединение не удовлетворяет условиям работоспособности, то необходимо менять параметры соединения, его вид, либо вовсе переходить на другой способ соединения.

5.1.1. Шпоночные соединения

Шпоночные соединения состоят из вала, шпонки и ступицы колеса (шкива или другой детали).

Шпонка – это деталь, устанавливаемая в пазах двух соприкасающихся деталей и препятствующая относительно повороту или сдвигу этих деталей.

Шпоночные соединения предназначены для передачи крутящего момента от вала к сидящим на нем деталям и наоборот.

Достоинства шпоночного соединения – конструктивная простота и сравнительная лёгкость сборки и разборки.

Недостатки шпоночного соединения:

1. Ослабление вала.
2. Необходимость применения длинных ступиц.
3. Технологическая сложность обеспечения необходимой точности, которая заключается в соблюдении двух технологических параметров:

а) симметрия плоскости шпоночных пазов относительно плоскости вала;

б) отсутствие перекоса шпонки на валу.

4. При любом способе сборки шпоночного соединения заметно возрастает торцевое биение сидящей на валу детали, особенно заметное при коротких ступицах.

Шпоночные соединения бывают ненапряженные и напряжённые (рис. 5.1). Ненапряженные соединения характеризуются отсутствием напряжения до передачи момента, в напряжённых соединениях до передачи момента напряжения присутствуют.

Ненапряженные соединения. Обычно для передачи крутящих моментов используются шпоночные соединения при диаметрах вала d_v свыше 5 мм.

При этом наиболее часто используются шпонки двух типов:

- призматические для диаметров валов свыше 5 мм;
- сегментные для диаметров валов от 13 до 58 мм.

По конструкции применяются шпонки двух исполнений:

- при термообработке вала и втулки – исполнение 1;
- при термообработке только вала – исполнение 2.

Все размеры сегментных шпонок определяются по таблицам ГОСТ, в зависимости от диаметра вала. Для призматических шпонок ширина b и высота h выбираются из таблицы ГОСТ в зависимости от диаметра вала, длина l шпонки зависит от размеров b и h и определяется по рекомендуемому ряду длин.



Рис. 5.1. Классификация шпонок

Призматические шпонки (рис. 5.2). ГОСТ 23360–78 предусматривает различные конструктивные исполнения призматических шпонок (рис. 5.3).

Размеры шпонок и шпоночных пазов принимают в зависимости от диаметра вала d_e по стандарту СЭВ 189–75. Рабочими у призматической шпонки являются боковые грани. Призматическая шпонка центрирует детали на валах, но не удерживает их от осевого смещения.

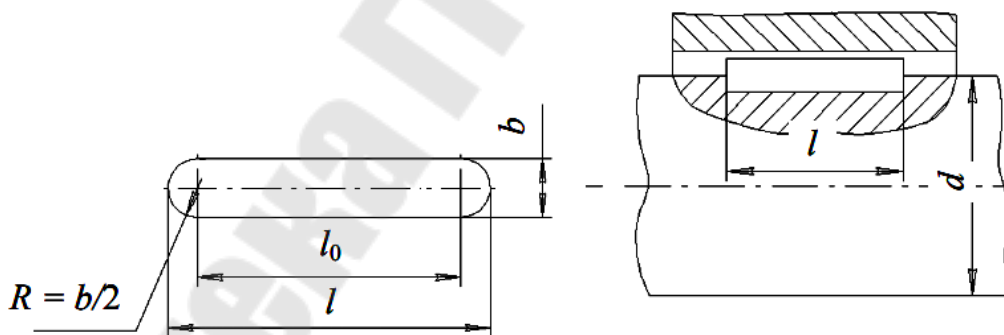


Рис. 5.2. Параметры призматической шпонки

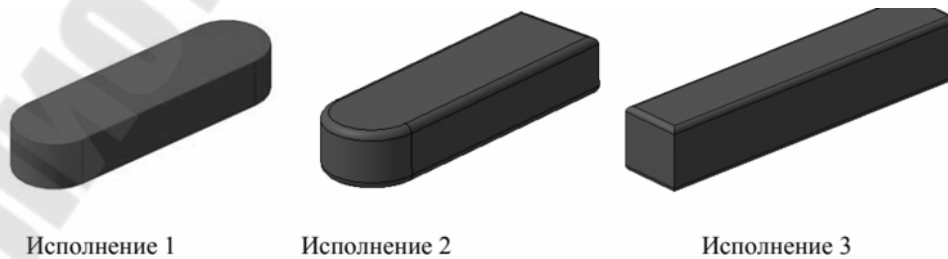


Рис. 5.3. Конструктивные исполнения призматической шпонки

Сегментные шпонки (рис. 5.4) отличаются от призматических более устойчивым положением шпонки на валу, что уменьшает перекося и концентрацию давления, но резко ослабляет сечение вала, поэтому эти шпонки применяют для диаметров валов $d_e \leq 58$ мм.

Стандартные шпонки изготовляют из специального сортамента среднеуглеродистой, чистотянутой стали (ГОСТ 8787–68, ГОСТ 8786–68). Легированные стали применяют для специальных шпонок.

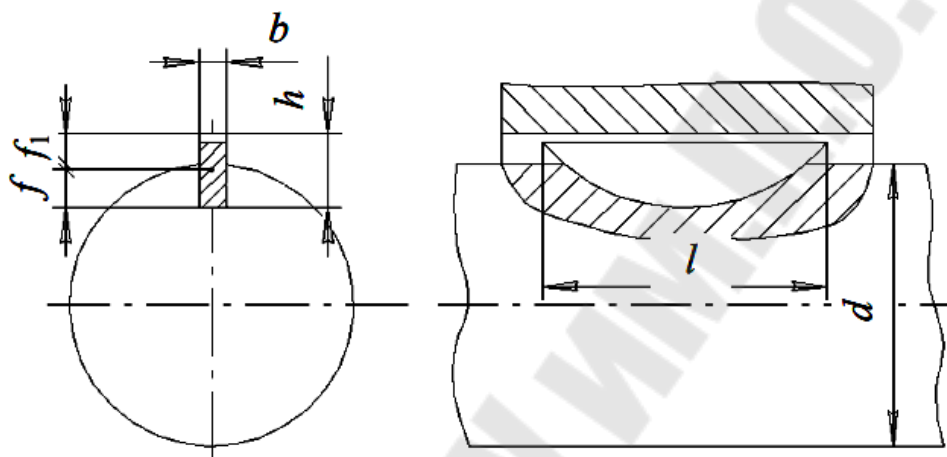


Рис. 5.4. Параметры сегментной шпонки

Напряженные соединения. К таковым принадлежат клиновые шпонки, имеющие форму клина с уклоном спинки 1:100. Размеры клиновых шпонок регламентированы ГОСТ 8792–68. Шпонки забивают в пазы, в результате чего отпадает необходимость в дополнительных креплениях детали на валу. Однако подобное напряжённое соединение нарушает правильность вращения, так как шпонка смещает «на себя» зазор между валом и отверстием ступицы колеса, т. е. нарушает центрирование деталей. Этот недостаток ограничивает применение клиновых шпонок.

Клиновая врезная шпонка (рис. 5.5) применяется в тихоходных передачах, хорошо воспринимает ударные и знакопеременные нагрузки. Работает широкими гранями, по боковым граням имеется зазор.

Клиновая фрикционная шпонка (рис. 5.6) применяется при необходимости частой перестановки в угловом и осевом направлениях.

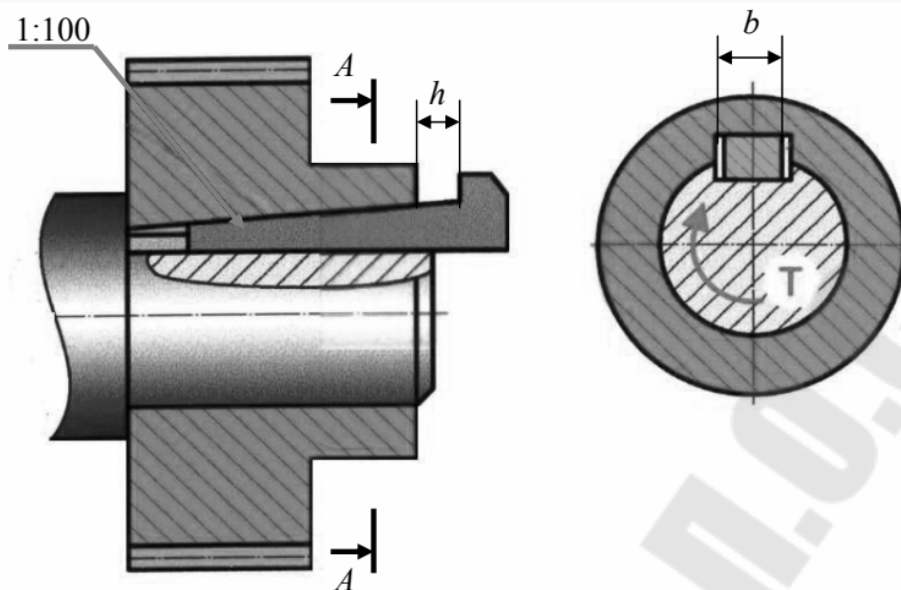


Рис. 5.5. Параметры клиновидной врезной шпонки

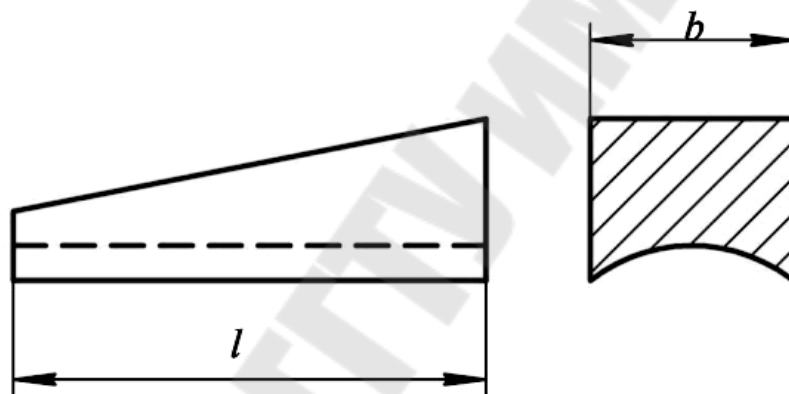


Рис. 5.6. Параметры клиновидной фрикционной шпонки

Клиновидная тангенциальная шпонка (рис. 5.7) представляет собой два клина с уклоном 1:100 каждый. Размеры этих шпонок регламентированы ГОСТ 8796–68. Работают узкими гранями. Натяг между валом и ступицей создается, в отличие от клиновидных врезных шпонок, не в радиальном, а в касательном (тангенциальном) направлении относительным осевым смещением клиньев. Применяются для диаметров валов $d_s > 60$ мм при передаче больших крутящих моментов с переменным режимом работы. Ставятся шпонки под углом 120–135°.

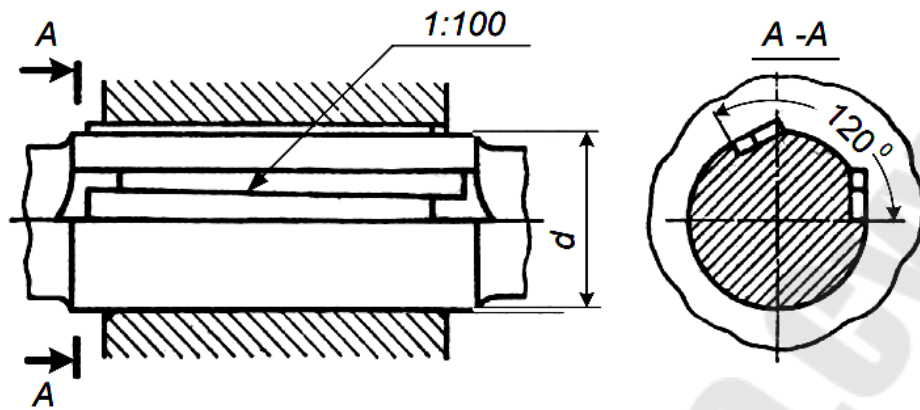


Рис. 5.7. Параметры клиновой тангенциальной шпонки

5.1.2. Шлицевые соединения

Шлицевые соединения широко применяются в машиностроении и в основном используются для передачи значительных нагрузок. Все размеры их стандартизованы.

Шлицевые соединения образуются выступами – зубьями на валу и соответствующими впадинами (пазами) в ступице. Рабочими поверхностями являются боковые стороны зубьев. Зубья вала фрезеруют по методу обкатки или накатывают в холодном состоянии профильными роликами по методу продольной накатки. Пазы изготавливают протягиванием.

Шлицевые соединения классифицируют как соединения с прямобочными зубьями (рис. 5.8, а), с эвольвентными зубьями (рис. 5.8, б), с треугольными зубьями (рис. 5.8, в).

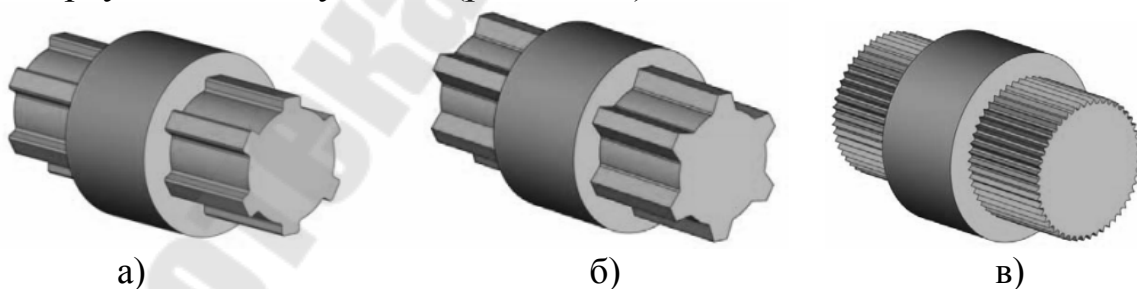


Рис. 5.8. Виды шлицевых соединений

По условиям эксплуатации в каждой группе шлицевых соединений предусматриваются три категории серий: тяжелая, средняя, легкая. Назначение, условие эксплуатации, а также термообработка поверхностей определяют допускаемые напряжения смятия поверхностей шлицев, т.е. условие прочности соединения.

Основные параметры шлицев определяются по стандарту в зависимости от диаметра вала d и серии.

Достоинства шлицевых соединений по сравнению со шпоночными:

1. Обеспечивается лучшее центрирование соединяемых деталей и более точное направление при осевом перемещении.

2. Уменьшается число деталей соединения. Шлицевое соединение образуют две детали, шпоночное – три-четыре.

3. При одинаковых габаритах допускают передачу больших вращающих моментов за счет большей поверхности контакта.

4. Обеспечивается высокая надежность при динамических и реверсивных нагрузках вследствие равномерного распределения нагрузки по зубьям.

5. Вал зубьями ослабляется незначительно. Шлицевый вал можно рассчитывать на прочность так же, как гладкий, диаметр которого равен внутреннему диаметру зубчатого вала.

6. Уменьшается длина ступицы.

Недостатками шлицевых соединений по сравнению со шпоночными является более сложная технология изготовления, а следовательно, и более высокая стоимость.

5.1.3. Штифтовые соединения

Штифтовые соединения используются в конструкциях:

1) для передачи крутящего момента с одновременной фиксацией положения деталей по отношению друг к другу;

2) для передачи сдвигающих сил и фиксации взаимного положения деталей при повторной сборке.

В первом варианте обычно рекомендуются конические штифты (рис. 5.9), во втором варианте – цилиндрические (рис. 5.10).

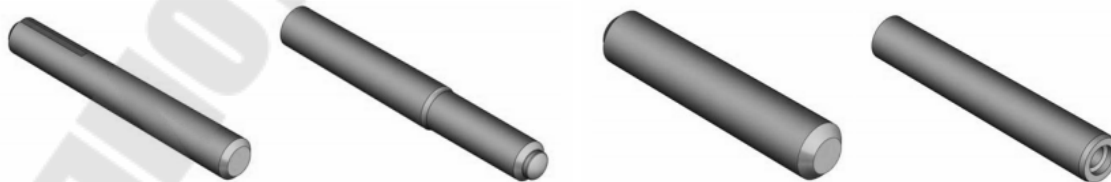


Рис. 5.9. Конструкция конических штифтов

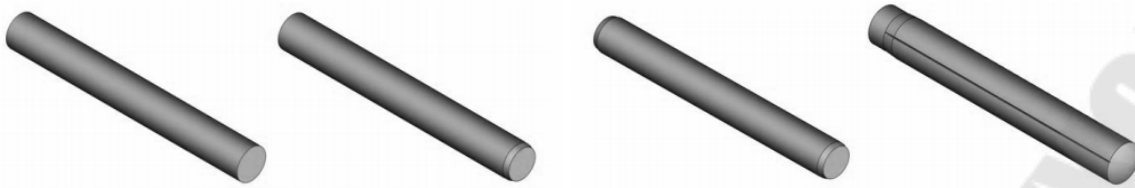


Рис. 5.10. Конструкция цилиндрических штифтов

В государственном стандарте предусмотрены следующие типы штифтов:

а) цилиндрические: цилиндрический гладкий (тип 1), цилиндрический насечной (тип 2), цилиндрический установочный (тип 3);

б) конические: конический гладкий (тип 4), конический установочный с резьбовой цапфой (тип 5), конический с внутренней резьбой (тип 6), конический разводной (тип 7).

Указанные номера типов штифтов присвоены штифтам в процессе разработки схемы алгоритма расчёта и выбора штифтовых соединений.

Для изготовления штифтов используются сталь 45, сталь А12, сталь серебрянка У10А, а также бронза БрКМц3-1.

5.1.4. Критерии оптимизации разъёмных не резьбовых соединений

В системах автоматического проектирования механических устройств необходимо, чтобы программные средства не только обеспечивали минимальные времязатраты на проектирование устройства соединения, но и гарантировали оптимальный вариант соединения. Так как главным критерием работоспособности соединения является его прочность, то в качестве основного критерия оптимизации параметров соединения выбирается ограничение недогрузки соединения не более 20 % либо его перегрузки до 10 % от расчётной нагрузки.

В этом случае прочность соединения оценивается коэффициентом нагружения, представляющим собой отношение фактического напряжения в соединении к значению допускаемого напряжения для принятых материалов.

Условие оптимальной работоспособности:

для шпоночного соединения:

$$0,8 \leq K_{см} = \frac{\sigma_{см}}{[\sigma]_{см}} \leq 1,1; \quad 0,8 \leq K_{ср} = \frac{\tau_{ср}}{[\tau]_{ср}} \leq 1,1$$

для шлицевого соединения:

$$0,8 \leq K_{см} = \frac{\sigma_{см}}{[\sigma]_{см}} \leq 1,1;$$

для штифтового соединения:

$$0,8 \leq K_{ср} = \frac{\tau_{ср}}{[\tau]_{ср}} \leq 1,1,$$

где $K_{см}$, $K_{ср}$ – коэффициенты запаса прочности по смятию и срезу; $\sigma_{см}$, $\tau_{ср}$ – фактические напряжения смятия и среза; $[\sigma]_{см}$, $[\tau]_{ср}$ – допускаемые напряжения смятия и среза.

5.1.5. Условия работоспособности

Шпоночные соединения. *Сегментные шпонки* проверяются на работоспособность по напряжениям смятия и среза по формулам:

$$\sigma_{см} = \frac{2T}{Zkl(d+k)}; \quad \tau_{ср} = \frac{2T}{Zbld}, \quad (5.1)$$

где T – крутящий момент, Н · мм; Z – число шпонок; k – высота выступающей части шпонки, мм; l – длина шпонки, мм; d – диаметр вала, мм; b – ширина шпонки, мм.

Если в соединении возникает перегрузка, т. е. $\sigma_{см}/[\sigma]_{см} > 1,1$ или $\tau_{ср}/[\tau]_{ср} > 1,1$, следует увеличить число сегментных шпонок до двух либо перейти на соединение призматической шпонкой. При недогрузке более 20 % уменьшаются размеры шпонки.

Призматические шпонки проверяются на работоспособность по напряжениям смятия и среза также по формулам (5.1).

В случае перегрузки ($\sigma_{см}/[\sigma]_{см} > 1,1$ или $\tau_{ср}/[\tau]_{ср} > 1,1$) следует либо увеличить длину ступицы детали, либо увеличить число призматических шпонок до двух, либо перейти на шлицевое соединение. При недогрузке более чем на 20 % необходимо изменить размеры шпонки, сократив ее длину или ширину и высоту.

Шлицевые соединения. В машиностроительных конструкциях наиболее широко применяются два вида шлицевых соединений: прямобочные и эвольвентные. Эти соединения по назначению разделяются на три группы:

- 1) неподвижные,
- 2) подвижные не под нагрузкой,
- 3) подвижные под нагрузкой.

Оценка работоспособности шлицевых соединений выполняется по условию прочности на смятие боковых поверхностей шлицев.

Напряжения смятия вычисляются по следующим зависимостям:

а) для прямобочного соединения:

$$\sigma_{см} = \frac{T}{0,7Z\left(\frac{D-d}{2} - 2f\right)\left(\frac{D+d}{2}\right)l_{см}} \quad (5.2)$$

б) для эвольвентного соединения при центрировании по наружному диаметру:

$$\sigma_{см} = \frac{T}{0,7Z \cdot 0,9ml_{см}\left(\frac{D-m-f}{2}\right)} \quad (5.3)$$

в) для эвольвентного соединения при центрировании по боковым поверхностям:

$$\sigma_{см} = \frac{2T}{0,63Z^2 \cdot m^2 l_{см}} \quad (5.4)$$

где T – передаваемый крутящий момент, Н · мм; Z – число шлицев; D – наружный диаметр шлицев, мм; d – внутренний диаметр шлицев, мм; f – высота фаски, мм; $l_{см}$ – длина смятия ступицы детали, мм; m – модуль эвольвентных шлицев, мм.

При перегрузке соединения ($\sigma_{см}/[\sigma]_{см} > 1,1$) следует увеличить параметры шлицы либо длину ступицы. Если соединение недогружено ($\sigma_{см}/[\sigma]_{см} > 0,8$), то необходимо уменьшить эти параметры либо перейти на шпоночное соединение.

Штифтовые соединения. Штифты, передающие крутящий момент, выбираются в зависимости от диаметра вала по соответствующим таблицам ГОСТ.

Такие штифты проверяются на касательное напряжение среза $\tau_{ср}$, Н/мм², материала штифта по формуле:

$$\tau_{ср} = \frac{4T}{\pi d_e d_{ш}^2} \quad (5.5)$$

где T – передаваемый валом крутящий момент, Н · мм; d_v – диаметр вала, мм; $d_{ш}$ – диаметр штифта, мм.

Для штифтов, передающих крутящие моменты, в случае перегрузки необходимо отказаться от такого способа соединения и перейти на шпоночные соединения. При недогрузках более 20 % уменьшается диаметр штифтов.

Фиксирующие штифты (для фиксации положения детали и передачи сдвигающих сил) выбираются по таблицам ГОСТа, в зависимости от толщины соединяемых деталей. Для такого соединения необходимо выбирать число соединительных штифтов $Z \geq 2$.

Эти штифты также проверяются на напряжение среза:

$$\tau_{ср} = \frac{4F}{\pi Z d_{ш}^2} \quad (5.6)$$

где F – сдвигающая сила, Н.

Если в соединении возникает перегрузка, т.е. $\tau_{ср}/[\tau]_{ср} \leq 1,1$, то для фиксирующих штифтов увеличивается либо их число, либо диаметры.

5.1.6. Проблемы проектирования соединений

Проектирование шпоночного соединения

Проблема выбора типа шпонки. При значениях диаметров вала менее 3 мм для сегментных шпонок и менее 5 мм для призматических следует отказаться от такого соединения, заменив его на штифтовое.

При значениях диаметров вала более 42 мм сегментные шпонки не применяются – следует выбрать другой тип шпонки. При значениях диаметров вала более 200 мм используются только шлицевые соединения.

Проблема выбора термообработки. Предусмотрено два варианта термообработки деталей соединения:

- а) термообработке подвергается только вал;
- б) термообработка применяется для вала и втулки насаживаемой детали.

Второй вариант повышает нагрузочную способность по напряжениям смятия и частично снимает контактную перегрузку детали.

Проблема выбора параметров шпонки. Рекомендуемые значения ширины, высоты и длины шпонки находят по таблицам стандар-

тов. Для призматических шпонок значения ширины и высоты шпонки можно принимать либо рекомендуемые, либо меньше в случае недогрузки, согласовав эти величины со стандартными значениями.

Длина шпонки для данного сечения должна соответствовать стандартному диапазону.

Для сегментных шпонок каждому значению ширины соответствует несколько значений высоты, поэтому высоту шпонки вводят путем выбора стандартных значений. Длина сегментной шпонки не выбирается, так как ее значение строго соответствует выбранным значениям ширины и высоты.

Проблема недогрузки шпоночного соединения. Для уменьшения процента недогрузки можно использовать следующие варианты:

а) уменьшить длину призматической шпонки. Для этого нужно взять меньшую длину шпонки из списка рекомендуемых длин;

б) уменьшить высоту сегментной шпонки, выбрав из стандартного перечня другое значение. Уменьшить размеры поперечного сечения шпонки b и h , согласовав эти значения со стандартом. При значительной недогрузке целесообразно отказаться от шпоночного соединения и перейти на штифтовое.

Проблема перегрузки. Устранить перегрузку шпонки призматической можно путём увеличения ее длины. Для этого необходимо выбрать из стандарта бóльшую длину стандартной шпонки.

Перегрузку сегментной шпонки можно снизить за счет увеличения ее высоты и длины.

Исключить перегрузку можно постановкой нескольких шпонок. При значительной перегрузке целесообразно отказаться от шпоночного соединения и перейти на шлицевое соединение.

Проектирование шлицевого соединения

Проблема выбора параметров шлицев. Для шлицевых эвольвентных соединений необходимо уточнить значение наружного диаметра шлицев и модуля согласно стандарту. Значение модуля в процессе расчета можно изменять при перегрузках и недогрузках соединения.

Для прямобочных шлицев все значения параметров выбираются в зависимости от исходных данных.

Проблема недогрузки. Для уменьшения процента недогрузки следует:

а) уменьшить длину ступицы детали;

б) изменить серию шлицев, перейдя на более легкие условия работы и эксплуатации;

в) при значительной недогрузке следует отказаться от шлицевого соединения и выбрать шпоночное соединение.

Проблема перегрузки. Устранить перегрузку шлицевого соединения можно следующим образом:

а) увеличить длину ступицы детали;

б) изменить условия работы на более тяжёлые путём замены серий шлицев.

Проектирование штифтового соединения

Проблема выбора параметров штифта. Рекомендуемые значения диаметров штифта и его длину находят по таблицам стандартов. При этом значение диаметра можно принимать либо рекомендуемые, либо меньше. Длину штифта следует принимать в диапазоне стандартных значений для данного диаметра в бóльшую сторону по отношению к рекомендуемому.

Проблема недогрузки. Для уменьшения процента недогрузки есть два пути:

а) уменьшить диаметр штифта либо число штифтов;

б) взять менее прочный материал штифта.

Проблема перегрузки. При перегрузке штифтового соединения, предназначенного для передачи крутящего момента, необходимо отказаться от этого типа соединения и перейти на шпоночное соединение.

5.2. Резьбовые соединения

5.2.1. Основные понятия и определения

Резьбовые соединения – это разъёмные соединения деталей с помощью резьбы или резьбовых крепежных деталей – винтов, болтов, шпилек, гаек.

Резьба образуется путем нанесения на поверхность деталей винтовых канавок с сечением согласно профилю резьбы. Образованные таким образом выступы носят название витков.

При сборке и разборке резьбового соединения крепежные винты поворачивают или удерживают от поворота соответствующим инструментом (ключом, отверткой) или непосредственно рукой за головку винта.

Болт – крепежная деталь в виде стержня с головкой и резьбой, на которую навинчивают крепежную гайку (рис. 5.11).

Гайка – это деталь с резьбовым отверстием, навинчиваемая на винт и имеющая форму, приспособленную для захвата ключом или рукой.

Достоинства резьбовых соединений:

- возможность создания больших осевых сил благодаря клиновому действию резьбы;
- возможность фиксирования зажима в любом положении благодаря самоторможению;
- небольшие габариты и простота изготовления;
- надежность и удобство сборки и разборки;
- возможность точной установки соединяемых деталей и любой степени затяжки крепежными деталями.

Недостаток – наличие концентраторов напряжения, понижающих их прочность.

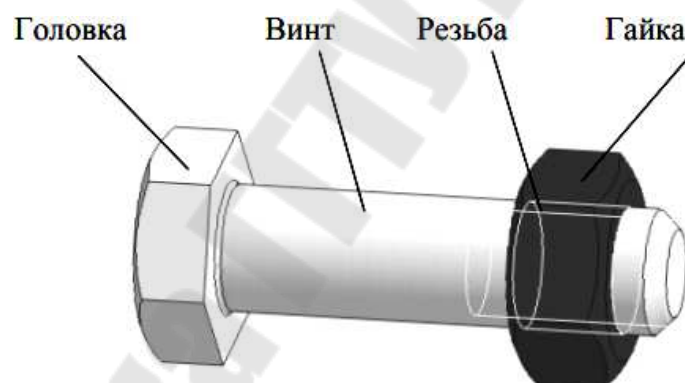


Рис. 5.11. Конструкция болта

К основным параметрам резьбы относятся (рис. 5.12):

- диаметр резьбы (винта и гайки): наружный d , D ; средний d_2 , D_2 ; внутренний d_1 , D_1 ;

- профиль резьбы – это профиль выступа и канавки резьбы в плоскости ее осевого сечения;

- угол профиля α – угол между смежными боковыми сторонами резьбы осевого сечения;

- рабочая высота профиля h , по которой соприкасаются витки винта и гайки;

- шаг резьбы p – расстояние по линии, параллельной оси резьбы между средними точками ближайших одноименных боковых сторон профиля резьбы, лежащими в одной осевой плоскости по одну сторону от оси резьбы.

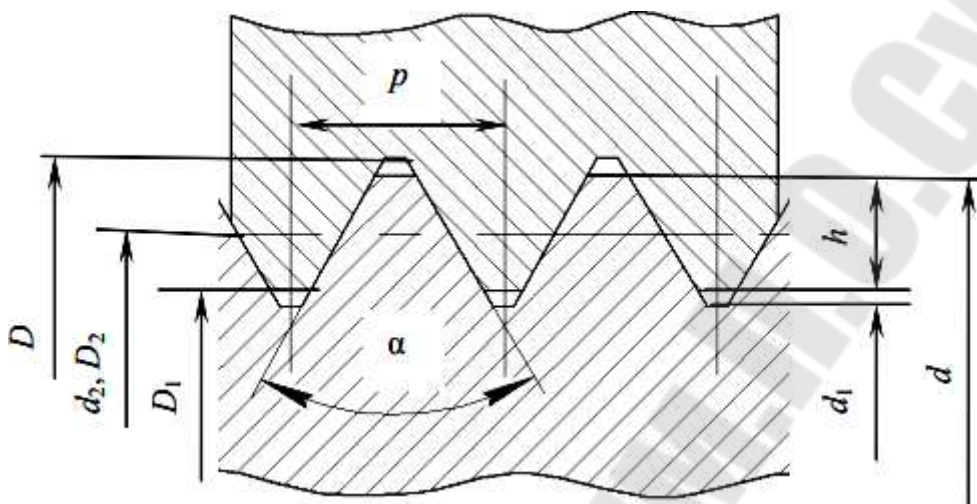


Рис. 5.12. Параметры резьбы

5.2.2. Классификация резьб

По назначению различают резьбы:

- крепежные, предназначенные для скрепления деталей треугольного профиля (метрические, дюймовые и часовые);
- крепежно-уплотняющие, служащие для скрепления деталей и предохранения от вытекания жидкости (трубная цилиндрическая и коническая, коническая дюймовая и круглая);
- ходовые, служащие для передачи движения в ходовых и грузовых винтах (прямоугольная, трапецидальная и упорная).

Приведенное деление резьб по их назначению не является строгим, так как крепежные треугольные резьбы иногда используются для особо точных ходовых винтов с малым шагом, а упорные резьбы применяют в качестве крепежных.

В зависимости от формы поверхности, на которой образуется резьба, различают цилиндрические и конические резьбы.

Крепежные резьбы

Метрическая резьба (рис. 5.13, а) является основной крепежной резьбой. Она имеет треугольный профиль с $\alpha = 60^\circ$, бывает с крупным и мелким шагом: $d = 1 \dots 600$ мм, $p = 0,2 \dots 6$ мм (ГОСТ 8724–81).

Дюймовая резьба (рис. 5.13, б). В странах СНГ ее применяют для импортных машин: $\alpha = 55^\circ$, диаметр – в дюймах, шаг – число ниток резьбы на длине в 1 дюйм. При обозначении указывают наружную резьбу в дюймах.

Часовая резьба является разновидностью метрической, но с более мелким диаметром: $d = 0,25 \dots 0,9$ мм; $p = 0,075 \dots 0,225$ мм.

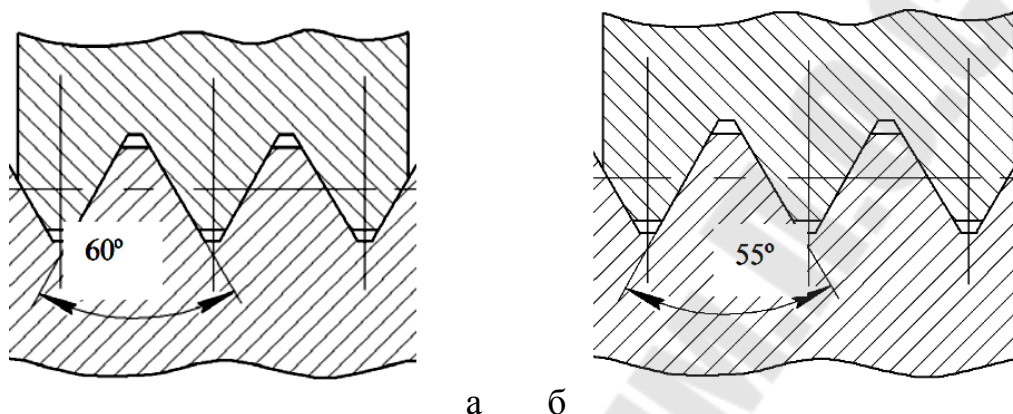


Рис. 5.13. Крепежные резьбы: а – метрическая; б – дюймовая

Крепёжно-уплотняющие резьбы

Трубные цилиндрические (рис. 5.14, а) и *конические* (рис. 5.14, б) резьбы представляют собой мелкие дюймовые резьбы (число ниток резьбы на 1 дюйм – от 28 до 11), нарезаемые в основном на трубах и арматуре трубопроводов с $d = 1/8'' \dots 6''$. Для лучшего уплотнения резьбу выполняют с закругленным треугольным профилем без зазоров по выступам и впадинам. Условное обозначение дается по внутреннему диаметру трубы (в дюймах).

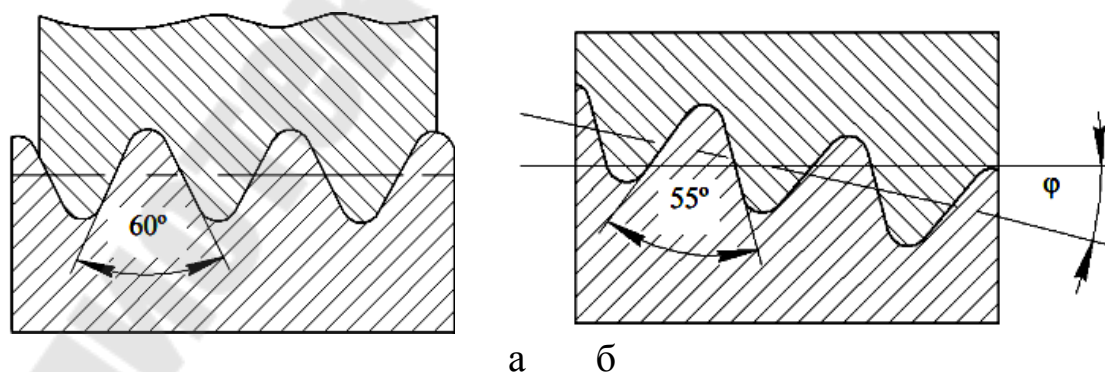


Рис. 5.14. Крепежно-уплотняющие резьбы: а – цилиндрическая; б – коническая

Коническая дюймовая резьба является разновидностью дюймовой резьбы. Нарезают ее на конических поверхностях резьбовых изделий с наружным диаметром $d = 1/16''-2''$. Такая резьба обеспечивает герметичность соединений, ее применение позволяет резко сократить время на завинчивание и отвинчивание (уменьшается угол относительного поворота винта или гайки).

Круглая резьба (рис. 5.15) применяется для резьбовых соединений, несущих большие динамические нагрузки (вагонные сцепки), в загрязненной среде с частым отвинчиванием (пожарная арматура), а также в тонкостенных изделиях, требующих герметичности или хорошего контакта (патрон и цоколь электролампы и т.п.). Эта резьба удобна для изготовления отливкой, а также выдавливанием в тонкостенных деталях.

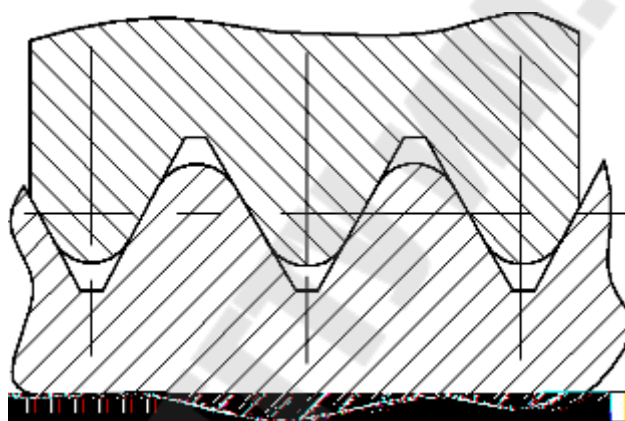


Рис. 5.15. Профиль круглой резьбы

Ходовые резьбы

Прямоугольная резьба (рис. 5.16, а) имеет прямоугольный или квадратный профиль, d и p – в миллиметрах. Эта резьба не стандартизована и применяется сравнительно редко.

Трапецидальная резьба (рис. 5.16, б) широко применяется в передачах винт–гайка. Она имеет симметричный профиль с $\alpha = 30^\circ$. По сравнению с прямоугольной трапецидальная резьба имеет бóльшую прочность. При использовании гайки, разъемной по осевой плоскости, такая резьба позволяет выбирать зазоры путем радиального сближения половин гайки и тем самым устранять люфтовый ход при износе резьбы.

Упорная резьба (рис. 5.16, в) используется в нажимных винтах с большой односторонней осевой нагрузкой. Резьба имеет несимметричный профиль. Закругление повышает прочность винта.

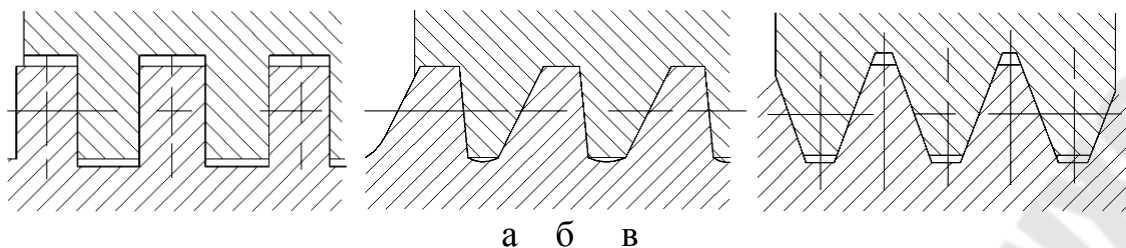


Рис. 5.16. Профиль ходовых резьб:

а – прямоугольной; б – трапецеидальной; в – упорной

5.2.3. Материалы для изготовления резьбовых изделий

Для изготовления резьбовых изделий используют следующие материалы:

- углеродистые стали – Ст3, Ст4, Ст5, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45. Низкоуглеродистые стали применяются благодаря хорошей деформируемости, так как в массовом производстве они изготавливаются холодной высадкой;

- автоматные стали – А12, А20, А30;

- для тяжело нагруженных крепежных резьбовых изделий применяют легированные стали марок 20ХН, 30ХНЗА, 40ХН2МА и др.

Широкое применение резьбовых соединений обусловило необходимость их унификации и стандартизации. Стандартизованы основные параметры резьбы (резьба и ее допуски), растворы ключей и др.

5.2.4. Расчет одиночных болтов

При расчете болтов необходимо учитывать конструктивные особенности соединения, материалы, действующие силы и характер их действия (рис. 5.17).

К конструктивным особенностям соединения относятся следующие: соединение, нагруженное отрывающей силой и затянутое при сборке, и соединение, нагруженное поперечными силами, сдвигающими детали в стыке.

Соединение, нагруженное отрывающей силой и затянутое при сборке. На соединение действует нагрузка F . Пусть на болт действует часть внешней нагрузки χF , тогда на деталь будет действовать оставшаяся часть нагрузки, т. е. $(1 - \chi)F$, где χ – коэффициент основной нагрузки. Основное условие работоспособности соединения – равенство деформаций болта δ_b и соединяемой детали δ_d .

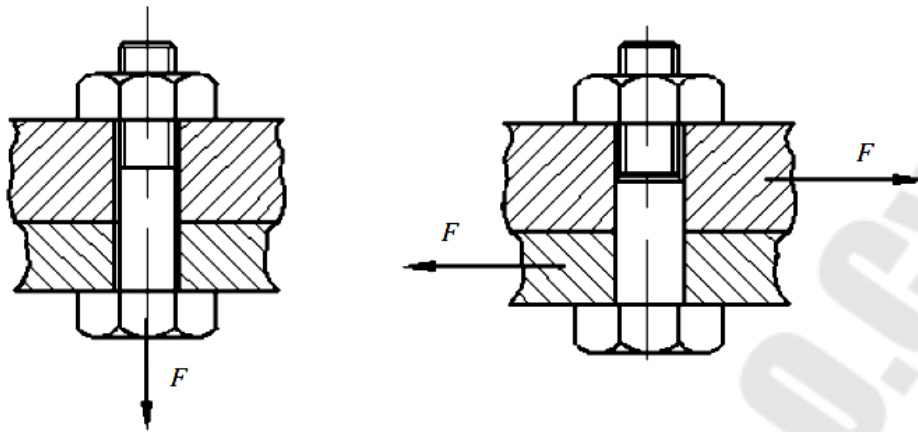


Рис. 5.17. Схема расчета болтового соединения

В нашем случае $\delta_{\sigma} = \delta_{\sigma}$, $\Delta l_{\sigma} = \Delta l_{\sigma}$, т.е. на сколько удлинится болт, на столько сожмется деталь.

Длина болта l_{σ} с учетом длин детали l_{σ} и свинчивания l_{σ} :

$$l_{\sigma} = l_{\sigma} + 0,5l_{\sigma}$$

В общем случае деформация от растяжения при действии нагрузки вычисляется по формуле:

$$\Delta l = \frac{Fl}{EA},$$

где E – модуль упругости; A – площадь сечения.

Для нашего случая:

$$\frac{\chi Fl_{\sigma}}{E_{\sigma} A_{\sigma}} = \frac{(1 - \chi) Fl_{\sigma}}{E_{\sigma} A_{\sigma}}$$

Обозначим $\frac{l_{\sigma}}{E_{\sigma} A_{\sigma}} = \lambda_{\sigma}$ и $\frac{l_{\sigma}}{E_{\sigma} A_{\sigma}} = \lambda_{\sigma}$,

где λ – податливость, которая равна деформации под нагрузкой 1 кг.

Тогда получим:

$$\chi F \lambda_{\sigma} = (1 - \chi) F \lambda_{\sigma}.$$

Из этого уравнения находим коэффициент основной нагрузки:

$$\chi = \frac{\lambda_{\sigma}}{\lambda_{\sigma} + \lambda_{\delta}}.$$

Для определения A_{δ} необходимо выполнить следующее:

- 1) отметить размер под ключ – D_1 ;
- 2) через точки, отмеченные под ключ, провести линии $\operatorname{tg} \alpha = 0,4\text{--}0,5$ под углом 45° к плоскости стыка, т. е. получить два усеченных (пустотелых) конуса;
- 3) определить объем конусов, этот объем приравнять к объему цилиндра, т. е. $V_{\kappa} = V_{\text{ц}}$, и площадь этого воображаемого цилиндра принять за A_{δ} :

$$A_{\delta} = \frac{\pi[(D_1 + h)^2 - d^2]}{4},$$

где h – высота меньшей из соединяемых деталей.

Таким образом, зная l_{δ} , l_{σ} , A_{δ} , A_{σ} , E_{δ} и E_{σ} определим λ_{δ} и λ_{σ} , а следовательно, и χ .

Для упрощения расчетов принимают:

- для соединения стальных и чугунных деталей без упругих прокладок $\chi = 0,2\text{--}0,3$;
- для соединения стальных и чугунных деталей с упругими прокладками (асбест, паранит, резина) $\chi = 0,4\text{--}0,5$.

Для того чтобы не было раскрытия стыка, необходимо затянуть болт с усилием:

$$F_{\text{зат}} = (1 - \chi)FK_{\text{зат}},$$

где $K_{\text{зат}}$ – коэффициент затяжки, зависящий от нагрузки; при постоянной нагрузке $K_{\text{зат}} = 1,25\text{--}2$, при переменной – $K_{\text{зат}} = 2\text{--}4$.

Итак, болт подвержен действию внешних сил χF , усилия затяжки $F_{\text{зат}}$. В период затяжки болт испытывает и растяжение, и кручение. Напряжение растяжения от $F_{\text{зат}}$, возникающее от затяжки болта:

$$\sigma_p = \frac{4F_{\text{зат}}}{\pi d_1^2}.$$

Напряжение кручения от момента в резьбе:

$$\tau_k = \frac{T_{F_t}}{W_p} = \frac{F_{зам} \frac{d_2}{2} \operatorname{tg}(\psi + \varphi')}{\frac{\pi d_1^3}{16}},$$

где W_p – полярный момент сопротивления; ψ – угол подъема винтовой линии; φ' – угол трения.

Эквивалентное напряжение в болте по гипотенузе формоизменения:

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_p^2 + 3\tau_k^2} = \sigma_p \sqrt{1 + 3\left(\frac{\tau_k}{\sigma_p}\right)^2}.$$

Отношение напряжений:

$$\frac{\tau_k}{\sigma_p} = \frac{F_{зам} \frac{d_2}{2} \operatorname{tg}(\psi + \varphi') \pi d_1^2}{4F_{зам} \frac{\pi d_1^3}{16}} = 2 \frac{d_2}{d_1} \operatorname{tg}(\psi + \varphi').$$

Принимая для метрической резьбы с крупным шагом $d_2 \approx 1,1d_1$, $\psi = 2^\circ 30'$ и $\varphi' = 9^\circ 45'$, получим $\tau_k/\sigma_p \approx 0,5$. Тогда $\sigma_E \approx 1,3$. Таким образом, расчет болта на совместное действие растяжения и кручения можно заменить расчетом на растяжение, принимая для расчета не силу затяжки $F_{зам}$, а расчетную F_p , увеличенную с учетом кручения:

- для метрических резьб $F_p = 1,3F_{зам}$;
- для трапецеидальных – $F_p = 1,25 F_{зам}$;
- для упорных и прямоугольных – $F_p = 1,2 F_{зам}$.

На основании вышеизложенного расчетная формула для определения прочности болта с учетом крутящего момента и затяжки примет вид:

$$F_p = \chi F + 1,3F_{зам}$$

или

$$\sigma_k = \frac{4F_p}{\pi d_1^2} \leq [\sigma]_p.$$

Здесь F_p – внешняя нагрузка, приходящаяся на один болт.

При таком способе загрузки болта допускаемое напряжение определяется как:

$$[\sigma]_p = \frac{\sigma_T}{S_T},$$

где S_T – требуемый коэффициент запаса прочности, который при неконтролируемой затяжке принимают по табл. 5.1 в зависимости от материала, характера нагрузки и диаметра резьбы.

Для силовых соединений не допускается применять болты диаметров меньше 8 мм, так как болты малых диаметров легко разрушить при затяжке.

При контролируемой затяжке (специальными динамометрическими ключами) величина $[S]_T$ не зависит от d . В этом случае:

- для углеродистых сталей $[S]_T = 1,7 \dots 2,2$;
- для легированных сталей $[S]_T = 2 \dots 3$.

Большие значения коэффициента запаса прочности принимают при невысокой точности определения действующих нагрузок или для конструкций повышенной ответственности.

Таблица 5.1

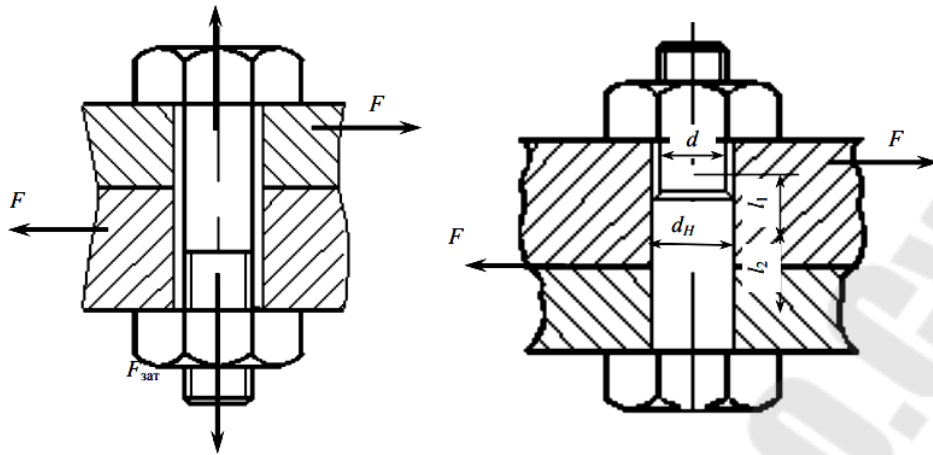
Значения коэффициента запаса прочности

Сталь	Коэффициент запаса прочности					
	Постоянная нагрузка			Переменная нагрузка		
	Диаметр резьбы d , мм			Диаметр резьбы d , мм		
	6...16	16...30	30...60	6...16	16...30	30...60
Углеродистая	5-4	4-2,5	2,5-1,6	10-6,5	6,5	6,5
Легированная	6,6-5	5-3,3	3,3	7,5-5	5	5-4

Соединение, нагруженное поперечными силами, сдвигающими деталями в стыке

Болты поставлены с зазором (рис. 5.18, а). В случае если $F_{тр} > F$, болт выберет зазор и будет работать на изгиб и быстро не разрушится. Изобразим осевую нагрузку $F_{зам}$, дадим коэффициент трения f , тогда $F_{тр} = F_{зам} \cdot i \cdot f$, где i – количество плоскостей среза. Отсюда:

$$F_{зам} = \frac{F}{i \cdot f}.$$



а б

Рис. 5.18. Установка болтов: а – с зазором; б – без зазора

Из условия растяжения:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4F_{зам}}{\pi[\sigma]_p}}$$

Вместо $F_{зам}$ подставив F/if , получим:

$$d_1 \geq \sqrt{\frac{4F}{if\pi[\sigma]_p}}$$

Болт, поставленный в отверстие с зазором, работает на растяжение (при условии $F_{тр} > F$).

Болты поставлены без зазора (рис. 5.18, б). Отверстие калибруется, а болт ставится с допуском, обеспечивающим беззазорную посадку.

Болты проверяются на срез. Всю нагрузку будет принимать диаметр с натягом d_H :

$$\tau_{ср} \frac{F}{A_{ср} i} \leq [\tau]_{ср},$$

$$\tau_{ср} \frac{F}{\frac{\pi d_H^2}{4}} \leq [\tau]_{ср},$$

где $[\tau]_{\text{ср}}$ – для стальных болтов, $[\tau]_{\text{ср}} = 0,2 \dots 0,3[\sigma]_{\text{т}}$; $2 i =$ при соединении трех деталей, $i = 1$ при соединении двух деталей.

5.2.5. Расчет группы болтов

Внешняя сила проходит через центр тяжести соединения

Группа болтов нагружена усилиями, равнодействующая которых перпендикулярна к плоскости стыка и проходит через центр его тяжести. Болты в этом случае нагружены равномерно (рис. 5.19).

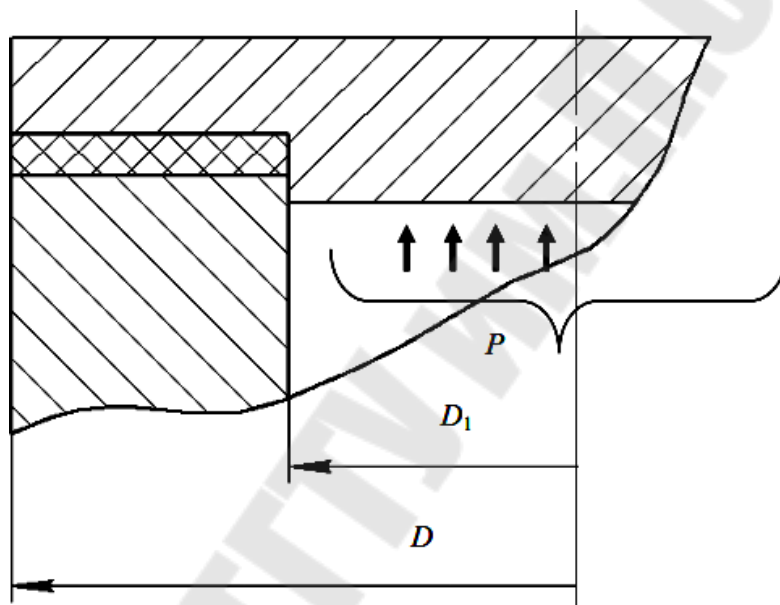


Рис. 5.19. Схема нагружения болтов

Внешняя нагрузка на все болты:

$$F_{\Sigma} = P \left[\frac{\pi D_1^2}{4} + \frac{\pi(D^2 - D_1^2)}{4} K_{\text{пр}} \right],$$

где P – давление; $K_{\text{пр}}$ – коэффициент, учитывающий материал и форму прокладок; для мягких прокладок (войлок, резина) $K_{\text{пр}} = 1,5 \dots 2,8$, для металлических плоских – $K_{\text{пр}} = 3,2 \dots 5,3$.

Внешняя нагрузка на один болт:

$$F = \frac{F_{\Sigma}}{Z},$$

где Z – число болтов.

Расчетная нагрузка на болт:

$$F_p = \chi F + 1,3F_{зам}.$$

Используя выведенную ранее зависимость $F_{зам} = (1 - \chi)FK_{зам}$, имеем:

$$F_p = 1,3(1 - \chi)FK_{зам} + \chi F = F[1,3(1 - \chi)K_{зам} + \chi].$$

Нагрузка соединения сдвигает детали в стыке

Болты с зазором и нагружены крутящим моментом в области стыка. Основное условие нераскрытия стыка - момент сил трения больше внешнего момента, т.е. $T_{тр} > T$:

$$\frac{F_{зам}Zf}{A_{см}} J_{см} > T,$$

где $F_{зам}$ – усилие затяжки болта; Z – число болтов; f – коэффициент трения; $A_{см}$ – площадь стыка; $J_{см}$ – статический полярный момент инерции стыка относительно главных центральных осей; T – действующий крутящий момент. Откуда:

$$F_{зам} \geq \frac{K_{зам}TA_{см}}{J_{см}Zf}.$$

Для кольцевого стыка пользуются приближенной формулой с учетом того, что $F_{мп}$ в стыке отнесена к осям винтов:

$$F_{зам} \geq \frac{K_{зам}T}{0,5DZf},$$

где $0,5D = R$ – плечо приложения момента T .

Условие реактивных моментов для стыка произвольной симметричной формы, т. е. внешний момент, уравновешенный моментами трения в n болтах:

$$F_{зам}fZ_1R_1 + F_{зам}fZ_2R_2 + \dots + F_{зам}fZ_nR_n \geq T.$$

Отсюда

$$F_{\text{зам}} \geq \frac{T}{Zf\Sigma R}.$$

Болты без зазора для кольцевого стыка рассчитываются на срез по усилию:

$$F = \frac{2T}{DZ}.$$

Для стыка произвольной симметричной формы:

$$F = \frac{TR_{\text{max}}}{\Sigma R^2 Z}.$$

Нагрузка соединения раскрывает стык деталей

Соединение нагружено изгибающим моментом M , открывающими F_Y и срезающими F_X усилиями.

Разложим действующую силу F на составляющие F_X и F_Y и приведем их к центру тяжести стыка. Появятся два момента $F_X H$ и $F_Y L$ (где H и L – расстояние до точек приложения соответствующих нагрузок), направленные в разные стороны. Предположим, что $F_X H > F_Y L$, тогда $M = F_X H - F_Y L$.

Итак, на соединение действуют силы F_X , F_Y и момент M .

Пусть на болты действуют χF_Y и χM , тогда на стык будут действовать соответственно $(1 - \chi)F_Y$ и $(1 - \chi)M$.

Напряжение в стыке алгебраически складывается из напряжений от отрывающей силы (разгружающей стык) F_Y :

$$\sigma_Y = \frac{(1 - \chi)F_Y}{A_{cm}} = \frac{(1 - \chi)F_Y}{ab},$$

где A_{cm} – площадь стыка; $A_{cm} = ab$, где a и b – стороны стыка.

Напряжение от момента M :

$$\sigma_M = \frac{(1 - \chi)M}{W_{cm}} = \frac{F_X H - F_Y L}{\frac{ab^2}{6}},$$

где W_{cm} – момент сопротивления стыка.

Напряжение затяжки стыка $\sigma_{зам}^{cm}$, определяемое из условия нераскрытия стыка $F_{mp} \geq F_{\chi}$:

$$\sigma_{зам}^{cm} = \frac{F_{зам} Z}{A_{cm}},$$

где Z – число болтов; $F_{зам}$ – усилие затяжки одного болта.

Как уже было отмечено, сила $(1 - \chi) F_Y$ уменьшает напряжение в стыке, а момент $(1 - \chi) M$ стремясь повернуть кронштейн по часовой стрелке, правую его часть догружает, а левую разгружает, поэтому минимальные напряжения имеют место в левой части стыка. Стык раскрыться не может, поэтому в левой его части должны наблюдаться незначительные напряжения смятия $[\sigma]_{зам}^{cm}$:

$$\sigma_{min} = \sigma_{зам} - \sigma_{FY} - \sigma_M \geq 0.$$

Обычно принимают $[\sigma]_{см}^{cm} = 1 \dots 2 \text{ Н/мм}^2$ и из этого равенства определяют $[\sigma]_{зам}^{cm}$ и $F_{зам}$.

После этого производится расчет болтов по наибольшему напряжению в болте:

$$\sigma_{max}^{\sigma} = \frac{F_{зам}}{A_{\sigma}} + \frac{\chi F_Y}{A_{\sigma} Z} + \frac{\chi M}{A_{\sigma} Z R} \leq [\sigma]_p.$$

5.2.6. Расчет болтов, подверженных действию переменных нагрузок

При действии на деталь переменной нагрузки, как известно, происходит усталостное разрушение детали. Амплитудное значение напряжений σ_a (наибольшее положительное значение переменной составляющей цикла), приводящее к разрушению, в 10...20 раз меньше, чем при статическом разрушении, поэтому обеспечение прочности болтов при переменных нагрузках представляет собой актуальную, но достаточно сложную задачу.

Наиболее характерным случаем действия переменных нагрузок является их действие по пульсирующему (отнулевому) циклу (коэффициент асимметрии цикла нагружения $r = 0$), когда нагрузка меняет-

ся от 0 до F_{max} , например соединение крышек цилиндров в двигателях внутреннего сгорания, дизелях и т. п.

При расчете учитывается действие только растягивающих нагрузок, так как крутящие нагрузки от затяжки при действии переменных нагрузок обычно снимаются и стержень болта раскручивается.

Очевидно, что в процессе работы соединения постоянным остается только усилие затяжки $F_{зам}$, меняется часть внешних сил χF , приходящихся на болт.

Используя предыдущие рассуждения, имеем:

$$F_{max} = F_{зам} + \chi F$$

или

$$\sigma_{max} = \sigma_{зам} + \sigma'_a = \frac{F_{зам}}{A_\sigma} + \frac{\chi F}{A_\sigma},$$

где F_{max} и σ_{max} – соответственно максимальные значения силы, действующей на болт, и напряжений, в нем возникающих.

Согласно графикам циклов изменения напряжений:

$$\sigma_{max} = 2\sigma_a + \sigma_{min}$$

Принимая $\sigma_{min} = \sigma_{зам}$, имеем:

$$\sigma_{max} = 2\sigma_a + \sigma_{зам},$$

где

$$\sigma_a = \frac{\sigma'_a}{2} = \frac{\chi F}{2A_\sigma}.$$

Усилия затяжки $F_{зам} = (1-\chi)FK_{зам}$ при переменных нагрузках уменьшают переменную составляющую χF (увеличивая часть внешних сил на затяжку $(1-\chi)F$, поэтому здесь целесообразна значительная затяжка соединений).

Обычно принимают $\sigma_{зам} = 0,4 \dots 0,6\sigma_m$, иногда $\sigma_{зам} = 0,8 \dots 1,0\sigma_m$.

Для расчета болтов используют диаграмму предельных напряжений в координатах $\sigma_{max} - \sigma_m$ (среднее), которая может быть построена

на при известных значениях коэффициента концентрации K_σ и масштабного фактора ε_σ , так как условия нагружения болтов при переменных нагрузках характеризуются высокой концентрацией напряжений в резьбе, особенно с увеличением диаметра резьбы.

Предельная амплитуда цикла $\sigma_{a.пред}$ практически не зависит от σ_m , так как при небольших σ_m в зонах концентрации напряжений появляется местная пластическая деформация. Поэтому предельная кривая прочности проведена под углом 45° .

Напряжение σ_{ann} , по сути, является пределом выносливости соединений, т.е.:

$$\sigma_{a.пред} = \frac{\sigma_{-1\sigma} \varepsilon_\sigma}{K_\sigma}$$

Для определения напряжений в конкретном болте необходимо из начала координат провести луч под углом β до пересечения с линиями, ограничивающими прочность болта, и на ней определить соответствующие напряжения:

$$tg\beta = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_m}$$

Далее определяются запасы прочности S болта по амплитудным максимальным напряжениям:

$$S_a = \frac{\sigma_{a.пред}}{\sigma_a} \geq 2,5 \dots 4; \quad S_{max} = \frac{\sigma_{пред}}{\sigma_{max}} \geq 1,5 \dots 2,5,$$

где $\sigma_{пред} = \sigma_m + \sigma_{a.пред}$.

Коэффициент концентрации K_σ выбирается по таблице 5.2 в зависимости от предела прочности σ_σ и типа резьбы.

Таблица 5.2

Значение коэффициента концентрации

σ_σ , МПа	Коэффициент концентрации	
	Тип резьбы	
	Метрическая	Дюймовая
400	3,0	2,2
600	3,9	2,9

800	48	3,5
1000	5,2	3,8

5.2.7. Расчеты резьбы на прочность

Расчеты резьбы на прочность проводятся как проверочные. Для стандартных резьбовых изделий проверку прочности резьбы проводить не надо, так как полагают, что стержень болта и резьба равнопрочны.

Проверка резьбы по напряжениям среза. Если материал гаек и болтов одинаков, то наиболее вероятный срез витков – по внутреннему диаметру болта d_1 :

$$\tau_{cp} = \frac{F}{\pi d_1 K H K_m} \leq [\tau]_{cp},$$

где K – коэффициент неполноты резьбы; для треугольной резьбы $K = 0,75$, для прямоугольной – $K = 0,5$, для трапецеидальной – $K = 0,65$; H – высота гайки, $H = 0,53d$; K_m – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки по виткам (при $d/d_2 < 16K_m = 5p/d$; $[\tau]_{cp} = (0,2 \dots 0,3)\sigma_T$ – допускаемое напряжение среза.

Если гайка менее прочная, то наиболее вероятен срез по внутреннему диаметру гайки (наружный диаметр болта d):

$$\tau_{cp} = \frac{F}{\pi d K H K_m} \leq [\tau]_{cp}.$$

Проверка резьбы по напряжениям смятия (для ходовых резьб). Не редки случаи, когда гайка работает в условиях частых завинчиваний и отвинчиваний. Условием работоспособности является расчет на деформацию смятия:

$$\sigma_{cm} = \frac{F}{\frac{\pi}{4} Z (d^2 - d_1^2) K_m} \leq [\sigma]_{cm},$$

где $[\sigma]_{cm}$ – допускаемое напряжение смятия; для углеродистых сталей $[\sigma]_{cm} = (0,8 \dots 1,0)\sigma_T$, для легированных сталей $[\sigma]_{cm} = (0,6 \dots 0,8)\sigma_T$.

5.3. Замковые соединения

Основной целью при конструировании большинства пластмассовых изделий является минимизация количества сборочных операций за счет объединения их функций и формования элементов крепежа заодно с пластмассовой деталью. Пластмассовые детали, изготовленные литьем под давлением, должны идеально соответствовать требованиям сборки, так как они могут иметь очень сложную геометрию. Эти требования относительно просты. Необходимо минимизировать число деталей, входящих в сборочный узел и изделие в целом. Нужно как можно реже использовать винты, болты, т. е. элементы механического крепежа, требующего при сборке вращения. Необходимо уменьшить количество таких технологических процессов, как, например, склеивание или сварка. К сожалению, это трудно осуществить на практике. Для формования деталей со сложной геометрией необходимы литьевые формы сложной конструкции. Усложняется и процесс литья под давлением. Поэтому экономия затрат при сборке может быть сбалансирована ростом стоимости оснастки и операции формования. Надежность литьевой формы в процессе формования может играть большую роль, чем усложнение ее конструкции.

Использование крепежных механических элементов заменяется введением в конструкцию отлитых деталей крючков.

Выбор метода сборки, который максимально соответствует данному изделию, осуществляется с учетом ряда требований, и прежде всего экономических. Очень большое значение имеют материалы, из которых изготавливают сборочные единицы. Например, для деталей из ПЭ лучше использовать прессовые или замковые соединения, поскольку его химическая стойкость и низкая поверхностная энергия затрудняют применение клеевых соединений. Сварные соединения предпочтительны для термопластов, но не для реактопластов. Если соединяемые детали изготовлены из разнородных материалов или в процессе сборки вовлекается третий материал, как это имеет место при склеивании или механическом креплении, нужно уделять повышенное внимание КЛТР.

Замковые соединения экономически очень выгодны, поскольку необходимые знаки отливаются прямо вместе с деталью. Это устраняет необходимость использования дополнительных крепежных элементов. Сборка замковых соединений обычно не вызывает затруднений. При этом нет необходимости совершать вращательные движения

или как-то фиксировать деталь. Замковые соединения могут быть сконструированы таким образом, что их можно использовать многократно.

На рисунке 5.20 показан пример замковой конструкции. Здесь важно точно определить размеры уступа и канавки. При разъеме соединяемых изделий осевое усилие должно отогнуть конец изделия с уступом и вывести его без повреждения из канавки: для этого угол должен быть в пределах $30\text{--}40^\circ$, а высота $l=(2\text{...}3)\delta_2$; размеры a и h целесообразно принимать равными для обоих соединений изделий: $h_2 < h_1$; $a_2 < a_1$; $\beta = 15\text{...}20^\circ$.

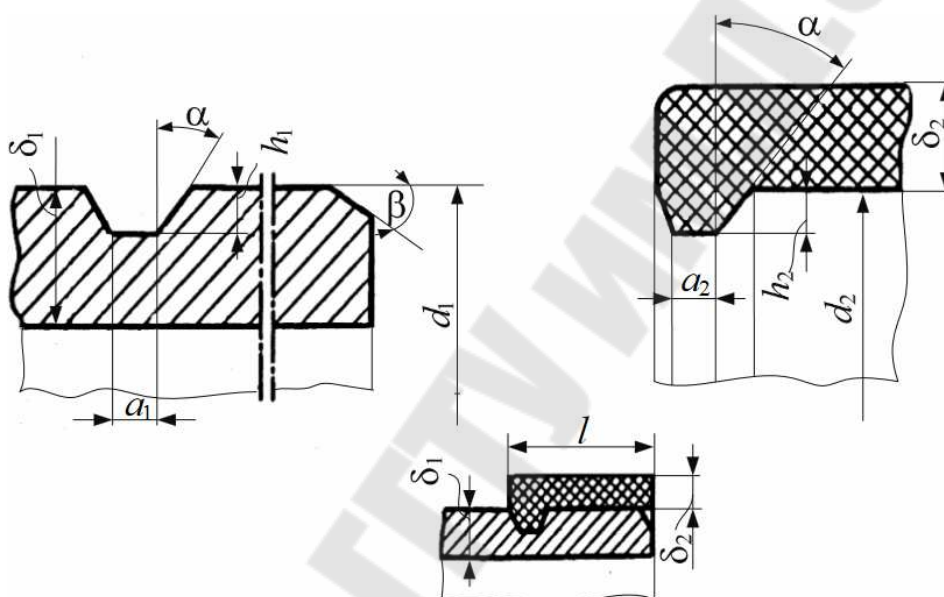


Рис. 5.20. Параметры замковой конструкции

Связь между деталями в замковом соединении обусловлена их конструктивными особенностями. В отличие от соединения прессовым способом в замковых соединениях упругое деформирование соединенных элементов наблюдается только при сборке и разборке изделия, что позволяет производить многократные сборки и разборки изделий. В ненагруженном состоянии элементы соединения совсем не испытывают или испытывают незначительные нагрузки.

Качество замковых соединений, и в частности их несущая способность, зависят от деформационных свойств, прочности, коэффициента трения пластмасс, температуры эксплуатации, геометрии соединения (выступа, длины и формы выступа, толщины стенок), которая определяет величину натяга.

При сборке или разборке на элементы соединения воздействует суммарная деформация (для цилиндрического соединения охватывающий элемент расширяется на ε_1 , а охватываемый сжимается на ε_2), которая равна натягу (H):

$$H = \varepsilon_1 + \varepsilon_2.$$

Прочность замкового соединения возрастает с увеличением натяга (глубины поднутрения). Однако, чтобы исключить пластические деформации при извлечении детали с поднутрениями из формы и при сборке, глубина полости должна быть не больше, чем максимальное упругое удлинение материала.

В качестве допустимой рекомендуется применять деформацию, равную половине деформации, которая соответствует границе текучести (табл. 5.3). Относительный натяг $H_{отн}$ может составлять 4% от номинального диаметра, равного $d - h$ (см. рис. 5.20). $H_{отн}$ рассчитывают по формуле

$$H_{отн} = \frac{H}{d - h} \cdot 100.$$

При использовании одной из деталей с удлиненным разрезом, которые способствуют появлению у нее спружиненных крючков, можно значительно увеличить глубину поднутрения. Такой спружиненный крючок можно рассматривать как консольно закрепленную балку (рис. 5.21).

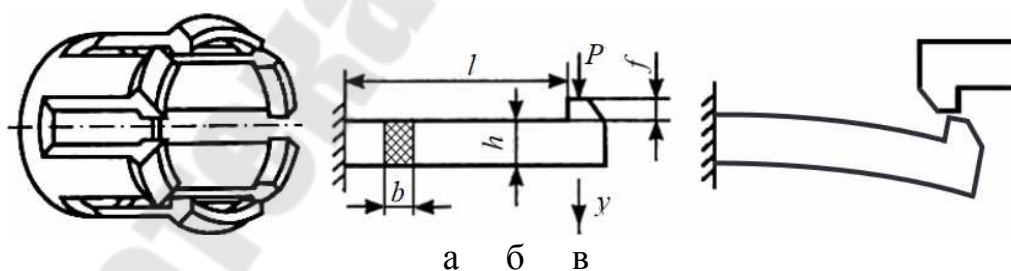


Рис. 5.21. Конструкция замкового соединения со спружиненными крючками: *а* – деталь с удлиненными разрезами; *б* – спружиненный крючок до сборки; *в* – спружиненный крючок при сборке

Таблица 5.3

Деформационные характеристики некоторых термопластов

Термопласт	Относительная деформация*, %	Модуль упругости, МПа
Полиоксиметилен (ПОМ)	10	3000
ПОМ + 30% стекловолокна	4	9000
Полиэтилентерефталат	5	3500
Полиамид 6 и полиамид 6,6	4–5	1600–2000
Поликарбонат	12	2400
Полифениленоксид	9	2500–2800
Сополимер АБС	3–5	2400
Полипропилен (ПП)	12	1200–1400
ПП + 30% стекловолокна	2–3	4500
Полистирол	1–1,5	3200
Полиэтилен	8–10	1000

* Соответствует границе текучести.

При сборке на крючок действует сила P , которая вызывает изгибающие и сдвигающие напряжения в балке.

Максимально возможная высота поднутрения f_{\max} соответствует максимально допустимому прогибу $f_{\text{пр}}$ свободного конца балки, который можно рассчитать согласно уравнению упругой линии:

$$f_{\text{пр}} = \frac{PL^3}{3EI},$$

где L – длина от выступа до основания крючка; E – модуль упругости; I – момент инерции.

Для более точного расчета f_{\max} необходимо учитывать деформацию сдвига $f_{\text{сдв}}$:

$$f_{\text{сдв}} = \frac{PL\chi}{FG},$$

где χ – коэффициент, который зависит от формы поперечного сечения (для прямоугольного сечения $\chi=1,2$); F – площадь поперечного сечения; G – модуль сдвига.

Вклад деформации сдвига в общую деформацию крючка составляет 10% при $L/h = 3$ и только при наличии в соединении коротких или толстостенных элементов.

Преобразовав формулу f_{\max} для приблизительных расчётов, получим:

$$f_{\max} = \frac{2\varepsilon_{\max} L^2}{3h}$$

где ε_{\max} – максимальное удлинение, которое соответствует границе текучести (см. табл. 5.3).

Сборку замковых соединений легче сделать при помощи скругления канта или оформления на конце скоса под углом встречи, который составляет 0,170...0,785 рад (см. рис. 5.20).

5.4. Неразъемные соединения

К неразъёмным относят соединения деталей с жёсткой механической связью, сохраняющейся в течение всего срока их службы. Разборка таких соединений невозможна без разрушений или повреждений самих деталей или связывающих их элементов. К неразъёмным соединениям можно отнести соединения деталей сваркой, заклёпками, склейкой, пайкой и натягом.

5.4.1. Сварные соединения

Сварка как высокопроизводительный процесс изготовления неразъемных соединений находит широкое применение. Использование сварных конструкций вместо клепаных дает экономию металла до 15...20 % (более полно используется рабочее сечение, возможно непосредственное соединение).

В результате уменьшения массы детали, трудоемкости изготовления, возможности автоматизации производства уменьшается стоимость изготовления детали.

Применение сварных деталей вместо литых обеспечивает экономию металлов до 30 % (чугунных – до 50...60 %), уменьшение припусков на механическую обработку и снижение стоимости изготовления деталей (стоимость проката почти в 2 раза меньше).

Основными недостатками сварных соединений является недостаточная стабильность качества шва (возможны непровары, пережоги), что снижает прочность сварных швов, особенно при переменных нагрузках. Качество шва повышается при использовании автоматической сварки.

Благодаря своим преимуществам сварка вытеснила заклепочные соединения из их традиционных областей применения (корпуса судов, котлы, резервуары, мосты, пространственные металлоконструк-

ции, подъемно-транспортные машины и др.) и позволила создать принципиально новые конструкции (штампосварные конструкции, заменяющие фасонное литье и клепаные конструкции, и т. д.).

Сварным соединением называется неразъемное соединение, состоящее из двух деталей и соединяющего их сварного шва.

Основные типы, конструктивные элементы и размеры сварных соединений устанавливает ГОСТ 5254–80. По взаимному расположению сварные соединения делятся на стыковые – условное обозначение С, нахлесточные – Н, тавровые – Т и угловые – У.

Первые три вида сварных соединений используют как силовые, четвертый – как вспомогательный и при передаче малых нагрузок.

Находят также применение соединения с накладками, пробочные и прорезные.

Стыковые сварные соединения (рис. 5.22) – типичные сварные соединения, в которых торцы или кромки соединяемых деталей располагаются так, что поверхность одной детали является продолжением поверхности другой детали.

Стыковые соединения без скоса кромок применяют при соединении свариваемых листов толщиной S до 12 мм. Листы толщиной до 4 мм сваривают односторонним швом, толщиной 2–12 мм – двусторонним швом. Стыковые соединения с V-образной разделкой кромок применяют при сварке металла толщиной 3...60 мм. При толщине металла 15...100 мм применяют V-образную разделку шва с криволинейным скосом одной или обеих кромок. Стыковые соединения с X- и K-образной разделкой кромок применяют при сварке металла толщиной 8...175 мм. Превышение шва $l_{ш}$ над основным металлом допускается не более 1...1,5 мм во избежание повышенной концентрации напряжений. При этом расход электродного металла, а следовательно, и электроэнергии почти вдвое меньше, чем при V-образной разделке кромок.

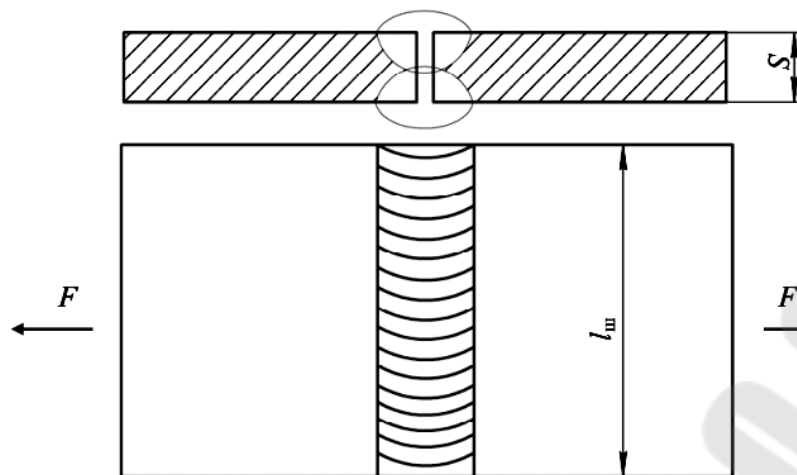


Рис. 5.22. Стыковое сварное соединение

Соединение встык имеет высокую прочность при статических и динамических нагрузках F . Его рационально применять для соединения листового металла, а также при стыковании уголковых профилей, швеллеров и двутавровых балок.

Нахлесточные сварные соединения (рис. 5.23) широко применяют при изготовлении различных строительных конструкций – колонн, мачт, ферм и др. Один элемент соединения накладывается на другой. Величина перекрытия должна быть не менее удвоенной суммы толщин свариваемых кромок изделия. Листы при сварке заваривают с обеих сторон, чтобы не допустить проникновения влаги в зазор между свариваемыми листами.

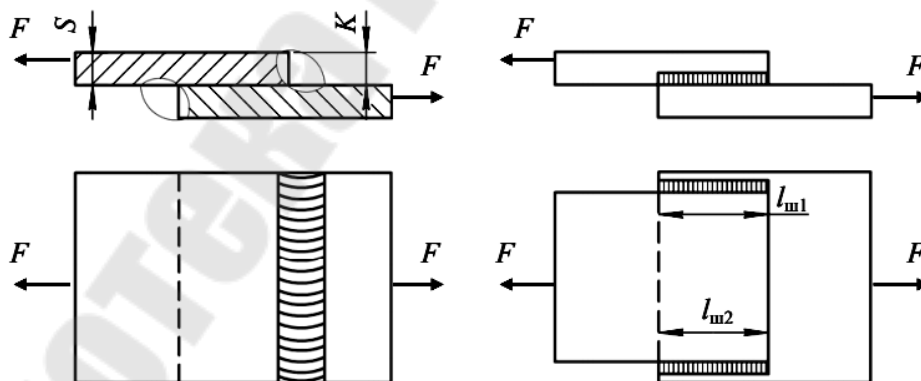


Рис. 5.23. Соединение внахлест

Тавровые сварные соединения (рис. 5.24) – это соединения, при которых торец одного элемента примыкает к поверхности другого элемента свариваемой конструкции под некоторым углом (чаще всего под прямым).

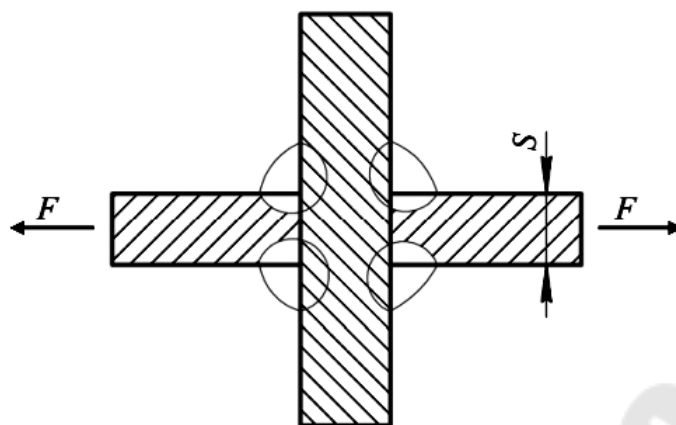


Рис. 5.24. Тавровое соединение

При малых толщинах свариваемого элемента, а также при ручной сварке подготовка кромок не проводится. Односторонняя подготовка кромок осуществляется при толщине листа $S = 4 \dots 26$ мм, двухсторонняя – при $S = 12 \dots 60$ мм. Для получения прочного шва зазор между свариваемыми элементами составляет $2 \dots 3$ мм.

Угловые сварные соединения (рис. 5.25) при малых толщинах ($S=2 \dots 8$ мм) выполняют ручной сваркой, при средних толщинах ($S=6 \dots 14$ мм) – полуавтоматической сваркой, при значительных толщинах ($S=10 \dots 40$ мм) – автоматической и полуавтоматической сваркой.



Рис. 5.25. Угловое соединение

Оценка работоспособности сварных швов. Общим условием работоспособности сварных соединений является равнопрочность сварного шва и соединяемых элементов.

Прочность стыкового сварного шва оценивается по величине нормальных напряжений среды σ_{cp} (Н/мм²), при действии растягивающих сил F (Н) и изгибающих моментов M (Н·м):

$$\sigma_{cp} = \frac{F}{l_w S} + \frac{M}{W_w} \leq [\sigma],$$

где $l_{ш}$ – длина шва, мм; S – толщина листа, мм; $W_{ш}$ – момент сопротивления сварного шва, мм³; $[\sigma]'$ – допускаемое напряжение материала сварного шва, Н/мм².

Расчет валиковых швов всех типов унифицирован и проводится условно по касательным напряжениям среза $\tau_{ср}$ в наиболее ослабленном сечении сварного шва по зависимости:

$$\tau_{ср} = \frac{F}{0,7l_{ш}K} + \frac{6M}{0,7Kl_{ш}^2} \leq [\tau]',$$

где $0,7K$ – расчетное значение катета шва, мм; $[\tau]'$ – допускаемое напряжение среза материала сварного шва, Н/мм². Допускаемые напряжения для сварного шва выбираются в зависимости от величины допускаемого напряжения для основного материала $[\sigma]$, путем понижения на величину коэффициента качества шва $K_{ш}$:

$$[\sigma]' = K_{ш}[\sigma]$$

или

$$[\tau]' = K_{ш}[\tau].$$

Значение коэффициента качества шва $K_{ш}$ берется по справочным данным в пределах 0,5...1, в зависимости от способа сварки, материала электрода и характера нагружения.

При проектировании сварных соединений определяется расчетная длина сварного шва.

Для стыкового соединения расчетная длина шва сравнивается с шириной соединяемых листов B , и если $l > B$, то сварной шов следует выполнить косым или усилить накладками с валиковыми швами.

Для валиковых швов при условии $l > B$ длина шва может быть увеличена за счет введения кроме лобового еще и фланговых сварных швов, т.е.:

$$l = l_l + l_f,$$

где l_l – длина лобового шва, мм; l_f – длина фланговых швов, мм.

5.4.2. Заклепочные соединения

Основным скрепляющим элементом заклепочных соединений является заклепка. Она представляет собой короткий цилиндрический стержень длиной L , диаметром d , на одном конце которого находится головка диаметром D , высотой H , а для некоторых видов – с углом конуса α (рис. 5.26).

Головки заклепок могут иметь сферическую, коническую или коническо-сферическую форму. В зависимости от этого различают головки *полукруглые* (рис. 5.26, а), *потайные* (рис. 5.26, б), *полупотайные* (рис. 5.26, в) и *плоские* (рис. 5.26, г).

Достоинства заклепочных соединений в сравнении со сварными:

1. Стабильность качества соединения. Надёжная работа при ударных и вибрационных нагрузках.
2. Надёжный и простой визуальный контроль качества.
3. Возможность соединения деталей из несвариваемых или подверженных короблению материалов.

Недостатки заклепочных соединений:

1. Ослабление деталей отверстиями и в связи с этим повышенный расход металла.
2. Менее удобные конструктивные формы и трудность автоматизации процесса склепывания.

Технология выполнения заклепочного соединения схематично представлена на рис. 5.27.

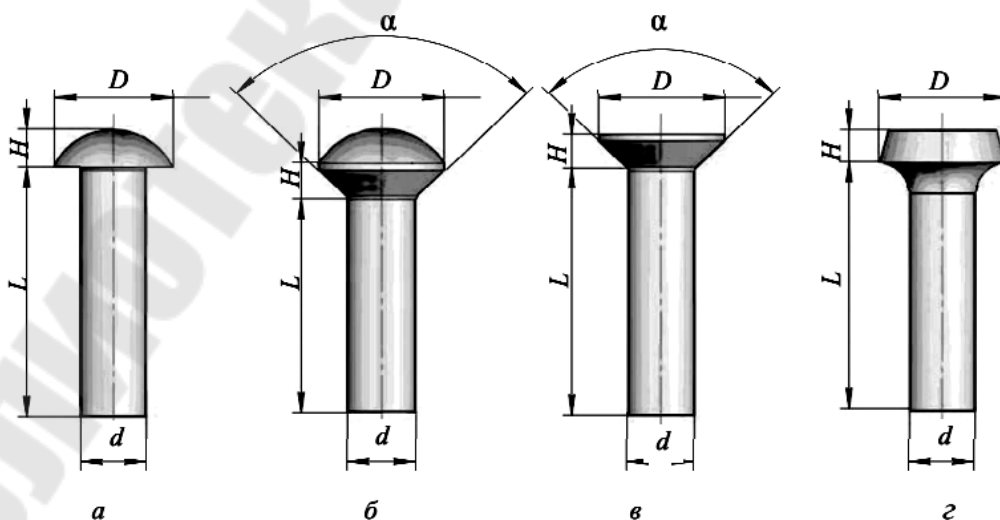


Рис. 5.26. Форма головок заклёпок

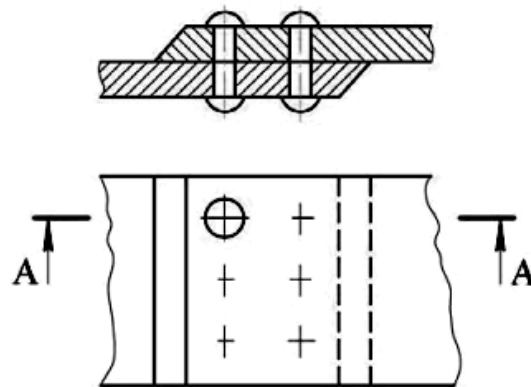


Рис. 5.27. Заклёпочное соединение

В соединяемых деталях выполняют отверстия сверлением или другим способом. В сквозное отверстие соединяемых деталей вставляют до упора головной стержень заклепки, причем заклепка может быть в горячем или холодном виде. Свободный конец заклепки выходит за пределы детали примерно на $1,5d$. Его расклепывают ударами или сильным давлением и создают вторую головку.

Диаметр стержней заклепок выбирают по специальным таблицам, ориентировочно он принимается равным толщине соединяемых деталей.

Длину стержня заклепки принимают также с учетом толщины соединяемых деталей и припуска. Ориентировочно она составляет $1,5d$.

Заклепочные швы бывают *однорядными* и *многорядными*. Заклепки обычно располагаются в ряду на одинаковом расстоянии. Расположение заклепок в шве может быть *рядовым* и *шахматным*. Соединяемые детали в заклепочных соединениях располагают внахлестку или встык с накладками.

На чертежах указывают все конструктивные размеры швов клепаного соединения. При этом не вычерчивают все заклепки соединения: обычно показывают одну-две из них, а места расположения остальных обозначают пересечением осей (рис. 5.27).

Оценка работоспособности заклёпочных соединений. Расчёт заклёпочных соединений состоит в определении количества заклёпок (расстояний между соседними заклёпками и рядами заклёпок) и их диаметра.

Работоспособность заклепочных соединений оценивается по величине напряжений среза стержня заклепки и смятия боковой по-

верхности (рис. 5.28). Заклепки необходимо располагать так, чтобы в них возникали только касательные напряжения среза. В этом случае условие прочности заклепки имеет вид:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{4F}{\pi d^2 Z I} \leq [\tau]_{\text{ср}},$$

где F – срезающая сила, Н; d – диаметр заклепки, мм; Z – количество заклепок; I – число плоскостей среза; $[\tau]_{\text{ср}}$ – допускаемое напряжение среза, Н/мм².

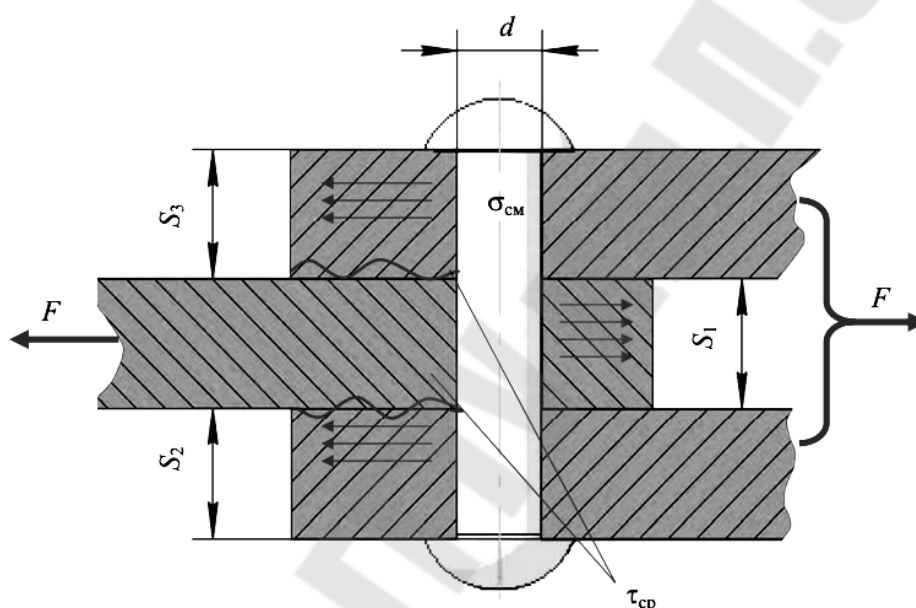


Рис. 5.28. Действующие напряжения в заклепочном соединении

Напряжения смятия боковой поверхности заклепки определяются по формуле:

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{F}{dZSI} \leq [\sigma]_{\text{см}},$$

где S – минимальная толщина соединяемых деталей, мм; $[\sigma]_{\text{см}}$ – допускаемое напряжение смятия, Н/мм².

Допускаемые напряжения $[\tau]_{\text{ср}}$ и $[\sigma]_{\text{см}}$ выбираются в зависимости от материала заклепки: низкоуглеродистые стали, дюралюминий, латунь, медь.

Диаметры стержней заклепок, шаг между ними, шаг между рядами выбирают в зависимости от толщины соединяемых деталей.

При проектировании заклепочных соединений по условиям прочности на срез и смятие определяют число заклепок Z , которое округляют до большего целого, а затем формируют расположение заклепок по рядам.

5.4.3. Клеевые и паяные соединения

5.4.3.1. Клеевые соединения

Клеевыми называют неразъёмные соединения элементов конструкций неметаллическим веществом, образующим между ним тонкую прослойку, посредством поверхностного схватывания и межмолекулярных связей в клеящем слое.

Достоинства:

1. Возможность соединения деталей из неоднородных материалов, существенно отличающихся по физико-механическим свойствам.
2. Возможность соединения элементов конструкций небольшой толщины.
3. Малая концентрация напряжений и высокое сопротивление усталости.
4. Хорошие тепло-, звуко- и электроизолирующие свойства.
5. Возможность получения герметичных соединений.
6. Невысокие требования к точности сопрягаемых деталей.
7. Малая масса самой клеевой прослойки.

Недостатки:

1. Нестабильность физико-механических и электрических свойств во времени (старение).
2. Ухудшение механических характеристик при низких и высоких температурах.
3. Необходимость тщательной подготовки поверхностей под склеивание.
4. Длительное время склеивания.
5. Сравнительно невысокая прочность при отрывающих нагрузках.

Области и объёмы применения клеевых соединений непрерывно расширяются. В автомобилестроении и станкостроении – отдельные зубчатые колеса соединяют в общий блок, повышают прочность сопряжения зубчатых венцов со ступицами, ступиц с валами, закрепляют в корпусе неподвижное центральное зубчатое колесо планетарной

передачи; в авиации и ракетно-космической технике – получают сложные и слоистые конструкции. Современные самолеты имеют до 500 м², а аэробусы до 1500 м² силовых комбинированных клеевых соединений.

Конструкции клеевых соединений

При проектировании клеевых соединений учитывают, что клеевые швы обладают высокой прочностью при сдвиге и невысокой при отрыве.

Применяют нахлесточные, соединения с накладками, стыковые и тавровые соединения (рис. 5.29).

Нахлесточные соединения наиболее распространены (рис. 5.29, а). Они хорошо работают при сдвиге и сжатии и являются самыми простыми и дешевыми в производстве. Проектировать соединение нужно так, чтобы внешние силы действовали только в плоскости клеевого слоя. Площадь клеевого соединения лучше увеличивать увеличением его ширины, а не удлинением нахлестки, что объясняется неравномерностью распределения напряжений по длине соединения. Благоприятное влияние на прочность соединения оказывают скосы кромок. Для снижения напряжений в подобных соединениях у кромки следует оставлять клеевой валик.

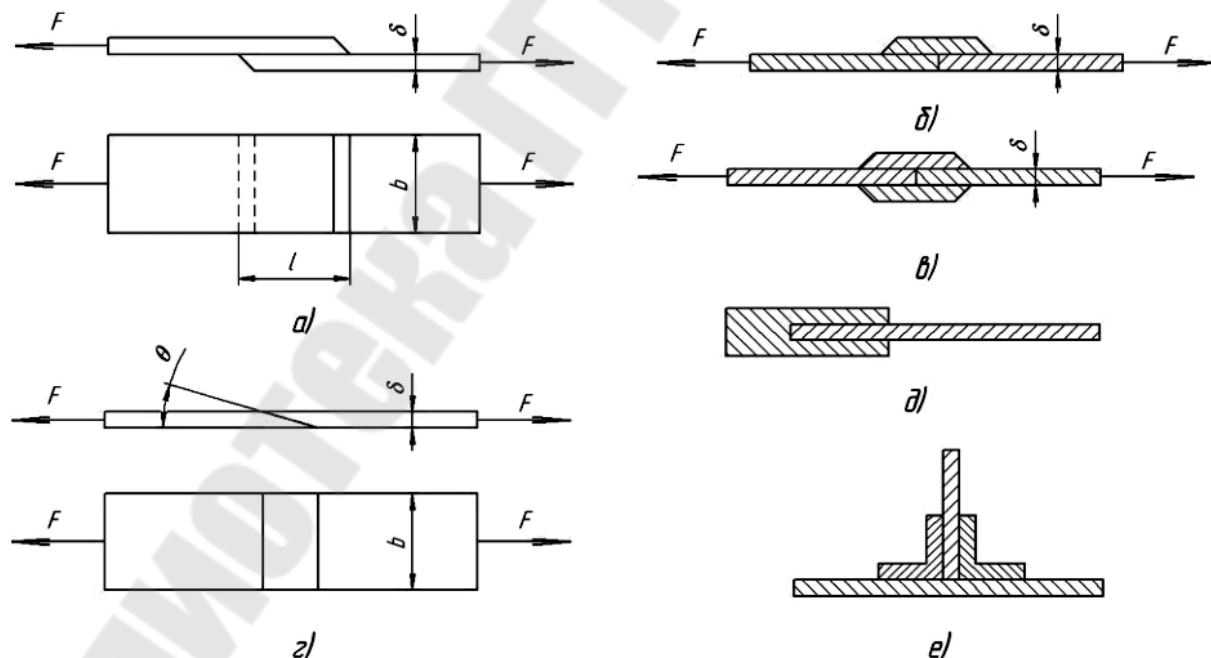


Рис. 5.29. Конструкции клеевых соединений

Соединениям с накладками также присущи неравномерность распределения напряжений по длине стыка и возникновение отрыв-

вающих напряжений у концов накладок (рис. 5.29, б). Соединения с односторонней накладкой применяют в таких конструкциях, где одна сторона должна быть ровной. Для увеличения прочности применяют две наклейки, края скашивают (рис. 5.29, в).

Стыковые соединения рационально применять при больших площадях соединения. Наибольшую прочность имеет усвое соединение, выполненное по косому срезу (рис. 5.29, з). Шпунтовые (рис. 5.29, д), шиповые и зубчато-шиповые соединения применяют в основном для соединения деревянных деталей.

В тавровых соединениях для увеличения прочности следует увеличить площадь склеивания (рис. 5.29, е) и выполнить скосы у кромок клееного шва.

Качественное клееное соединение может быть получено при выполнении следующих основных условий:

- коэффициенты линейного и объемного расширения склеиваемых материалов и клея равны или близки друг к другу;
- конструкция деталей допускает двусторонний подход к клееным швам и позволяет создать требуемое при склеивании технологическое давление;
- зазоры в клееных соединениях между поверхностями, прижатыми друг к другу с оптимальным давлением, не превышают 0,1 мм;
- предусмотрена защита кромок клееных швов от проникновения влаги (лаками, красками, замазками).

Для разгрузки клееного шва, подверженного действию отрывающих и вибрационных нагрузок, используют различные конструктивные способы силового замыкания соединяемых деталей. С этой целью применяют комбинированные соединения: клеесварные, клеезаклепочные, клеерезьбовые, клееные с натягом.

Расчет клееных соединений на прочность

Прочность нахлестанного соединения (рис. 5.29, а) оценивают по напряжениям сдвига:

$$\tau_{cp} = \frac{F}{bl} \leq [\tau]_{cp}$$

где F – действующее усилие, Н; b и l – длина и ширина нахлестки, мм; $[\tau]_{cp}$ – допускаемое напряжение среза материала шва; для клея БФ-2 $[\tau]_{cp} = 15 \dots 20$ МПа, для клея БФ-4 $[\tau]_{cp} = 25 \dots 30$ МПа.

Длину нахлестки можно принимать:

$$l = (2,5...5)\delta,$$

где δ – толщина склеиваемых листов.

Условия прочности для стыковых соединений листов, выполненных по косому срезу («на ус») (рис. 5.29, б):

– при действии растягивающей силы F :

$$\tau = F \sin \alpha \cos \alpha / (\delta b) \leq [\tau],$$

$$\sigma = F \sin^2 \alpha / (\delta b) \leq [\sigma];$$

– при действии изгибающего момента M :

$$\tau = 6 M \sin \alpha \cos \alpha / (\delta^2 b) \leq [\tau],$$

$$\sigma = 6 \cdot M \sin^2 \alpha / (\delta^2 b) \leq [\sigma],$$

где δ – толщина листов; α – угол скоса; $[\tau]$ – допускаемое напряжение сдвига; $[\sigma]$ – допускаемое нормальное напряжение.

Выбор клеев и склеивание

При выборе клея следует иметь в виду следующее. Клей должен иметь достаточно высокие когезионные (внутренние межмолекулярные связи) и адгезионные (способность к поверхностному схватыванию с соединяемыми материалами) характеристики, а в процессе отверждения – минимальную усадку. Время, в течение которого в условиях эксплуатации клей сохраняет свои свойства, должно соответствовать требуемому ресурсу изделия. По отношению к материалам конструкции клей не должен быть коррозионно-активным.

Клей должен характеризоваться хорошей зазоразаполняемостью.

Одним из важнейших показателей конструкционных клеев является термостойкость. По этому признаку клеи разделяют на группы: до 80; до 150; до 350; до 700 °С и выше.

Для склеивания деталей из металлов, конструкционных неметаллических материалов и их сочетаний наиболее широко применяют синтетические клеи. По клеевой основе синтетические клеи разделяют на терморезистивные, термопласты и эластомеры.

Основой терморезистивных клеев являются эпоксидные, фенолформальдегидные, полиуретановые и другие смолы. Термопластич-

ные клеи содержат полиэтилен, полистирол и другие полимеры. В состав эластомеров в качестве основы входит натуральный или синтетический каучук.

Для склеивания стальных деталей применяют клеи терморезистивные:

- эпоксидный ВК-9 ($\tau_{сдв} = 20$ МПа);
 - фенолформальдегидный ВК-32-200 ($\tau_{сдв} = 30$ МПа);
 - полиуретановый ВИЛАД-11К ($\tau_{сдв} = 23$ МПа);
 - термопластичный клей Циакрин ПЗ-2 ($\tau_{сдв} = 10$ МПа).
- Допускаемое напряжение сдвига можно принять:

$$[\tau] = \frac{\tau_{сдв}}{S}$$

где S – коэффициент безопасности (в зависимости от ответственности конструкции и условий ее работы $S = 1,5...3$).

При динамических нагрузках коэффициент S безопасности увеличивают в 3 раза.

При склеивании поверхность деталей должна быть хорошо очищена от загрязнений и обезжирена. Для этого ее очищают механически и промывают органическими растворителями или водными моющими растворами. Клей наносят на обе соединяемые поверхности.

Толщина и равномерность клеевого слоя влияют на прочность склеивания. Жидкие клеи наносят путем распыления, кистью, валиком, шпателем. Обычно толщина слоя составляет 0,05... 0,15 мм и зависит от вязкости клея и давления при склеивании. При отверждении клеев требуется давление до 2...2,5 МПа и для многих клеев нагрев в течение 1...2 ч в зажимных устройствах. Затем изделие должно быть охлаждено до нормальной температуры в приспособлении и выдержано в течение двойного времени охлаждения.

Наряду с жидкими клеями применяют клеи в виде пленок, которые вкладывают между соединяемыми деталями с последующим нагревом и сдавливанием.

Контроль качества соединений выполняют просвечиванием рентгеновскими или инфракрасными лучами.

5.4.3.2. Паяные соединения

Паяные соединения – неразъемные соединения элементов конструкций межатомными связями между материалами соединяемых деталей и присадочным материалом, называемым припоем.

Припой – сплав (на основе олова, меди, серебра) или чистый металл, вводимый в расплавленном состоянии в зазор между соединяемыми деталями с последующей его кристаллизацией. Температура плавления припоя ниже температуры плавления материалов деталей.

При пайке происходят растворение металла деталей в расплавленном припое, взаимная диффузия элементов припоя и металла соединяемых деталей, возникают атомные связи.

Отличие пайки от сварки – отсутствие расплавления или высокотемпературного нагрева материала соединяемых деталей.

При пайке не происходит расплавления кромок соединяемых деталей, поэтому проще сохранить в процессе нагрева требуемые форму и размеры изделия.

Наряду с использованием пайки как основного вида соединений в радиоэлектронной и электротехнической аппаратуре паяные конструкции получили широкое распространение в различных отраслях машиностроения.

Достоинства:

1. Возможность соединения не только однородных, но и разнородных материалов (стали со сплавами цветных металлов; металлы с графитом, фарфором; керамика с полупроводниками и т.п.).
2. Возможность соединения тонкостенных элементов, в которых применение сварки невозможно из-за опасности прожога.
3. Возможность изготовления конструкций из тугоплавких металлов (молибдена, ниобия, тантала, вольфрама), плохо поддающихся сварке.
4. Возможность распайки (разборки) без разрушения конструкций.
5. Малая концентрация напряжений вследствие высокой пластичности припоя.
6. Возможность получения соединения деталей в скрытых и труднодоступных местах конструкции.
7. Возможность соединения за один прием в единое целое множества элементов, составляющих изделие.

Недостатки:

1. Необходимость малых и равномерно распределенных зазоров между соединяемыми деталями, что требует их точной механической обработки и качественной сборки.

2. Необходимость тщательной очистки поверхностей перед пайкой и применение флюсов.

Паяные соединения применяют при изготовлении радиаторов в автомобилестроении, камер сгорания жидкостных реактивных двигателей, лопаток турбин, топливных и масляных трубопроводов, ядерных реакторов и др. С помощью пайки в обшивке самолета листы из алюминиевых сплавов заменяют высокопрочными и жесткими панелями из тонких стальных листов с сотовым и гофрированным промежуточным наполнителем, паяными в термических печах.

Способы пайки

Нагрев припоя и деталей в зависимости от их размеров, осуществляют паяльником, газовой горелкой, ТВЧ, в термических печах и др. Для уменьшения вредного влияния окисления поверхностей деталей при пайке применяют флюсы (на основе буры, канифоли, хлористого цинка), а также паяют в вакууме или в среде нейтральных газов (аргона).

При пайке с нагревом ТВЧ или в термической печи припой укладывают в процессе предварительной сборки деталей в месте шва в виде проволочных контуров, фольговых прокладок, лент или паст в смеси с флюсом.

Расплавленный припой растекается по нагретым поверхностям стыка деталей и при охлаждении кристаллизуется, прочно соединяя детали.

При высокотемпературной пайке в ряде случаев получают неразъемные соединения со свойствами, близкими к свойствам основных материалов, и прочностью, превышающей прочность сварных соединений (соединения деталей из высоколегированных жаропрочных сталей).

Конструкции паяных соединений

Пайкой соединяют листы, стержни, трубы, гнутые профили между собой или с плоскими деталями.

Паяные силовые соединения, как и сварные, выполняют нахлесточными (рис. 5.30, *а*), стыковыми (рис. 5.30, *б*) и тавровыми (рис. 5.30, *в*).

Размер зазора в стыке определяет прочность соединения. При малом зазоре лучше проявляется эффект капиллярного течения при-

поя, процесс растворения материала деталей в расплавленном припое распространяется на всю толщину паяного шва (прочность образующегося раствора на 30... 60 % выше прочности припоя).

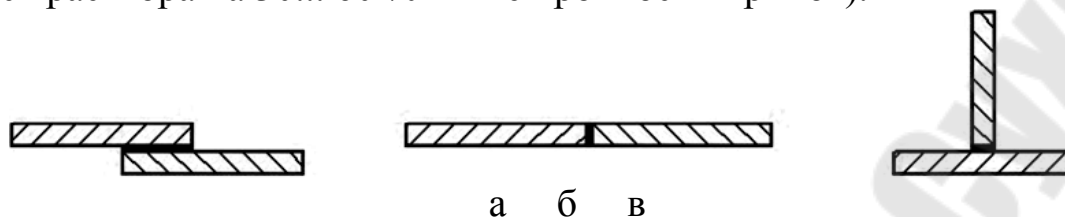


Рис. 5.30. Конструкции паяных соединений

Оптимальные зазоры при пайке деталей:

– из стали медным припоем 0,01...0,05 мм, серебряным припоем 0,05...0,25 мм;

– из алюминиевых сплавов алюминиевыми припоями 0,1...0,25 мм;

– из титана и его сплавов серебряными припоями 0,03...0,1 мм.

К припоям предъявляют следующие требования: легкоплавкость, хорошая смачиваемость соединяемых поверхностей, достаточно высокая прочность, пластичность, непроницаемость.

Коэффициенты линейного расширения материалов соединяемых деталей и припоев не должны сильно различаться.

Припои разделяют на высокотемпературные с температурой плавления $T_{пл} > 450$ °С и низкотемпературные с $T_{пл} < 450$ °С. К высокотемпературным относятся припои, включающие в качестве основного компонента медь, никель, серебро, а к низкотемпературным – включающие олово и свинец. Для пайки деталей из стали, меди и латуни применяют высокотемпературный припой ПСр40, низкотемпературный ПОС40, ПОС60, деталей из титановых сплавов – ПСр70.

Композиционные припои состоят из нерасплавляющегося при пайке наполнителя и расплавляющихся частиц. Наполнитель в виде порошка, волокон или сеток выполняют из материала, близкого к основному. Припой в жидкой фазе при пайке удерживается в зазорах между частицами наполнителя под действием капиллярных сил. Это предотвращает стекание припоя при пайке изделий в любом пространственном положении.

Качественное паяное соединение можно получить при исключительно чистых поверхностях соединяемых деталей. Непосредственно перед пайкой поверхности подвергают соответствующей обработке для очистки от загрязнений и масел, удаления оксидных пленок, а

также для нанесения покрытий, облегчающих протекание процессов пайки, нанесения барьерных покрытий.

Для уменьшения влияния окисления поверхностей деталей применяют специальные флюсы, которые подразделяют на низкотемпературные (канифольные, кислотные; $T_{пл} < 450$ °С) и высокотемпературные (боридные, боридно-углекисдые; $T_{пл} > 450$ °С). Для пайки стали, меди, латуни, бронзы, свинца применяют флюс следующего состава: 25...30 % хлористого цинка и 75...70 % дистиллированной воды.

Расчет паяных соединений на прочность

Стыковые паяные соединения (рис. 5.31, а) рассчитывают на прочность по номинальному сечению соединяемых деталей, используя формулу:

$$\sigma = \frac{F}{\delta \cdot l} + \frac{M}{W} \leq [\sigma],$$

где σ – суммарное напряжение; F – внешняя растягивающая сила; M – изгибающий момент, $[\sigma]$ – допускаемое напряжение на растяжение паяного соединения; W – момент сопротивления сечения детали в месте пайки:

$$W = \frac{\delta \cdot b^2}{6}.$$

Нахлесточное соединение (рис. 5.31, б) рассчитывают на срез:

$$\tau = \frac{F}{bl} \leq [\tau]_{ср}$$

где $[\tau]$ – допускаемое напряжение на срез паяного соединения; l и b – длина нахлестки и ширина детали.

С увеличением длины l нахлестки увеличивается неравномерность распределения напряжений, аналогично фланговому шву сварного соединения.

Допускаемые напряжения для паяных соединений деталей из низкоуглеродистых сталей при нагреве в печи и пайке припоем ПСр40: $[\sigma] = 220...240$ МПа; $[\tau] = 170...180$ МПа.

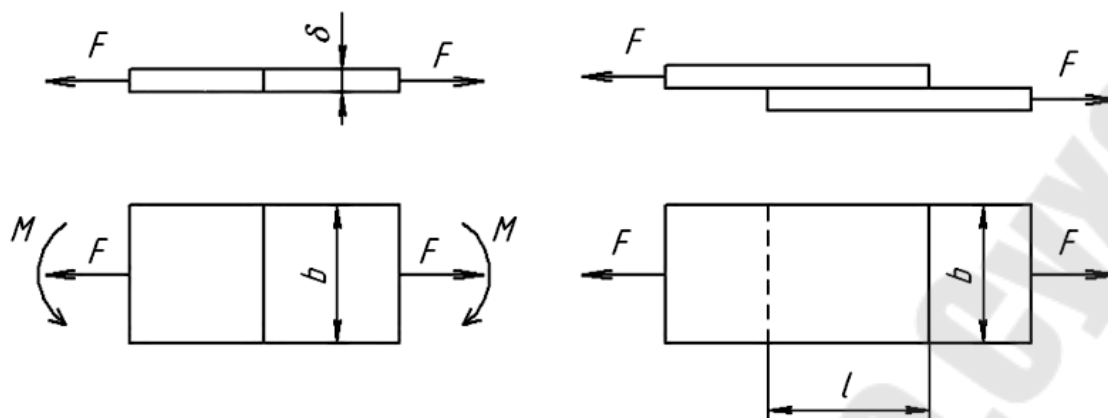


Рис. 5.31. Схема нагружения паяных соединений

5.4.4. Соединение деталей с гарантированным натягом

В соединениях деталей с гарантированным натягом взаимное смещение их относительно друг друга предотвращается силами трения на поверхности контакта (рис. 5.32).

Такие соединения могут воспринимать произвольно направленные силы и моменты. Используют их при больших, особенно динамических нагрузках и отсутствии необходимости в частой разборке (кривошипные, детали составных коленвалов, венцы зубчатых колес и т.д.).

Соединения с натягом можно разделить на две группы:

1) соединение деталей по цилиндрическим или коническим поверхностям, причём одна деталь охватывает другую (наиболее распространено);

2) соединения деталей по плоскости с помощью стяжных колец.

Характер соединения первой группы определяется натягом, т.е. разностью посадочных размеров. Натяг выбирается в соответствии с посадками, например: $\frac{7H}{u7}$; $\frac{7H}{t6}$; $\frac{7H}{r6}$; $\frac{7H}{s6}$; $\frac{7H}{p6}$ и др.

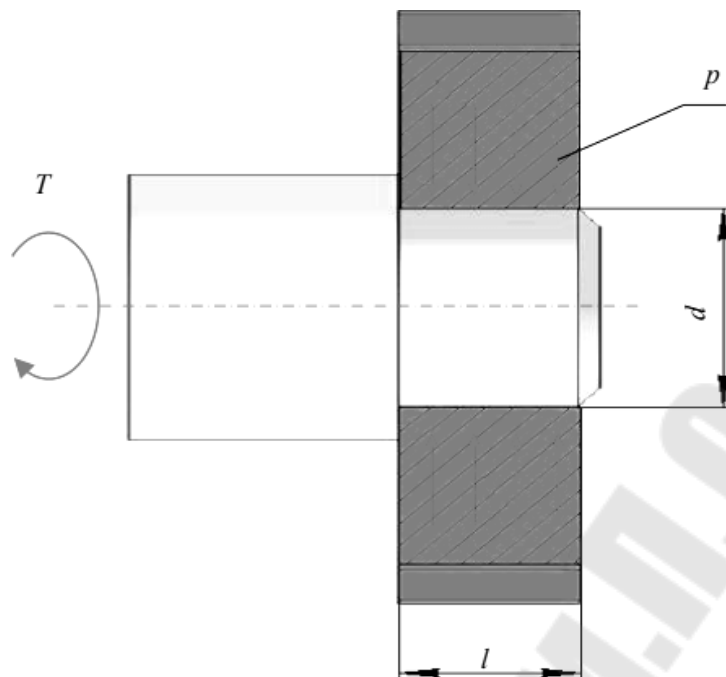


Рис. 5.32. Схема соединения деталей с гарантированным натягом

Достоинства соединений с гарантированным натягом в сравнении с другими соединениями, передающими усилия или моменты:

1. Возможность работать с большими нагрузками.
2. Хорошее восприятие ударных нагрузок (шпоночные соединения в таких условиях обминаются).
3. Просты в изготовлении и не ослабляют сечение вала.

Недостатком таких соединений являются трудности при сборке и разборке: появляются повреждения посадочных мест и ослабления посадки, отличающиеся большим рассеиванием прочности из-за действительных размеров вала и отверстия в пределах допуска.

По *способу* сборки различают:

- соединения, собираемые запрессовкой;
- соединения с нагревом охватывающей поверхности;
- соединения с охлаждением вала.

Сборка запрессовкой позволяет контролировать силу запрессовки и тем самым вести контроль за соединением. Однако прочность сцепления деталей, собираемых с помощью температурного деформирования, при том же натяге больше (почти в 1,5 раза), так как при этом гребешки микронеровностей не сглаживаются.

Необходимая величина натяга определяется минимальным потребным давлением на посадочной поверхности. Давление должно быть таким, чтобы силы трения были больше внешних сдвигающих сил.

При нагружении соединения осевой силой:

$$F_a \leq \pi d l p f \frac{1}{K_{сц}},$$

где d – диаметр посадочной поверхности, мм; l – длина посадочной поверхности, мм; p – давление на контактной поверхности, мм; f – коэффициент трения скольжения; $K_{сц}$ – коэффициент запаса по сцеплению.

Отсюда давление на контактной поверхности:

$$p \geq \frac{F_a K_{сц}}{\pi d^2 l f}.$$

При одновременном нагружении силой F_a и моментом T расчет ведется по равнодействующей силе

$$F = \sqrt{\left(\frac{2T}{d}\right)^2 + F_a^2} \leq \pi d l p f \frac{1}{K_{сц}}.$$

Откуда

$$p = \frac{FK_{сц}}{\pi d l f}.$$

Для практических расчётов принимают следующие значения коэффициента трения:

$f = 0,08 \dots 0,1$ – сборка прессованием;

$f = 0,12 \dots 0,14$ – сборка за счёт температурных деформаций.

РАЗДЕЛ 6. РЕШЕНИЕ КОНСТРУКТОРСКИХ ЗАДАЧ ПРИ ПОМОЩИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При проектировании машин, строительных конструкций, технологических процессов в научных исследованиях сегодня широко применяются программные комплексы компьютерного инженерного анализа (CAE), основанные на методе конечных элементов (МКЭ). Примерами комплексов CAE являются пакеты программ ANSYS, MSC.NASTRAN, MSC.MARC, COSMOS, ABAQUS, SOLID WORKS, CREO и др. Они позволяют численно решать самые разнообразные задачи из таких областей физики, как механика твёрдого деформируемого тела, механика жидкости и газа, теплопередача, электродинамика. Возможно решение связанных задач. Есть специализированные пакеты на базе МКЭ, которые предназначены для определённых технических приложений.

Чтобы эффективно использовать эти современные программные средства, необходимо знать не только теорию исследуемого физического процесса, но и владеть теорией МКЭ. Полезно также иметь навыки программирования для понимания компьютерной реализации МКЭ.

Метод конечных элементов (МКЭ) – это метод приближённого численного решения физических задач. В его основе лежат две главные идеи: дискретизация исследуемого объекта на конечное множество элементов и кусочно-элементная аппроксимация исследуемых функций.

Историческими предшественниками МКЭ были различные методы строительной механики и механики деформируемого твёрдого тела, использующие дискретизацию. Ещё Пуассон в начале 19 века предлагал рассматривать сплошную среду как систему конечных объёмов. Во второй половине 19 века Д. Максвеллом, А. Кастильяно и другими их современниками были заложены основы анализа стержневых конструкций. В последующие годы были сформулированы метод сил и затем метод перемещений.

Технический прогресс 20 века, прежде всего в области авиации и космонавтики, появление и быстрое совершенствование цифровых электронных вычислительных машин создали благоприятные условия для развития расчётных алгоритмов, основанных на декомпозиции конструкций. С 50-х годов началось практическое применение ЭВМ в инженерных расчётах, что способствовало возникновению различных

матричных методов анализа конструкций. Значительный вклад в развитие матричных методов строительной механики внесли Дж. Аргирис и другие, в том числе отечественные учёные.

Журнальная статья Тэрнера, Клафа, Мартина и Топпа, появившаяся в 1956 г., стала одним из первых сообщений о расчёте конструкции МКЭ. Клаф в 1960 г. ввёл термин «конечные элементы» (КЭ). Мелош в 1963 г. показал, что МКЭ можно рассматривать как вариант метода Ритца. В вариационном методе Ритца искомая функция аппроксимируется конечной суммой базисных функций, умноженных на неизвестные коэффициенты. Функционал, выраженный через аппроксимирующую функцию, минимизируется по неизвестным коэффициентам. Базисные функции по Ритцу должны удовлетворять граничным условиям задачи. Такое ограничение было снято Курантом в 1943 г., который, решая задачу о кручении методом Ритца, использовал кусочно-линейные аппроксимирующие функции на треугольных подобластях – конечных элементах. Неизвестными коэффициентами являлись значения искомой функции в узлах КЭ. Работа Куранта, по существу, была первой реализацией МКЭ.

Область применения МКЭ значительно расширилась, когда для его обоснования стали применяться методы взвешенных невязок – Галёркина и наименьших квадратов. МКЭ превратился в универсальный способ решения дифференциальных уравнений краевых задач.

Основное отличие МКЭ от классических алгоритмов вариационных принципов и методов невязок заключается в выборе базисных функций. Они берутся в виде кусочно-непрерывных функций, которые обращаются в нуль всюду, кроме ограниченных подобластей, являющихся конечными элементами. Это ведёт к ленточной разреженной структуре матрицы коэффициентов разрешающей системы уравнений.

Использование вариационных принципов и методов взвешенных невязок позволило глубже понять математические основы МКЭ и, в частности, определить условия сходимости этого численного метода к точному решению.

Быстрому росту популярности МКЭ и становлению его ведущим методом численного решения физических задач способствовал ряд преимуществ конечно-элементного анализа перед многими другими численными методами.

Главные достоинства МКЭ:

- 1) исследуемые объекты могут иметь любую форму и различную физическую природу – твёрдые деформируемые тела, жидкости, газы, электромагнитные среды;
- 2) конечные элементы могут иметь различную форму, в частности криволинейную, и различные размеры;
- 3) можно исследовать однородные и неоднородные, изотропные и анизотропные объекты с линейными и нелинейными свойствами;
- 4) можно решать как стационарные, так и нестационарные задачи;
- 5) можно решать контактные задачи;
- 6) можно моделировать любые граничные условия;
- 7) вычислительный алгоритм, представленный в матричной форме, формально единообразен для различных физических задач и для задач различной размерности, что удобно для компьютерного программирования;
- 8) на одной и той же сетке конечных элементов можно решать различные физические задачи, что облегчает анализ связанных задач;
- 9) разрешающая система уравнений имеет экономичную разреженную симметричную ленточную матрицу «жёсткости», что ускоряет вычислительный процесс на ЭВМ;
- 10) удобно осуществляется иерархическая дискретизация исследуемой области на подобласти с образованием суперэлементов, что позволяет эффективно использовать параллельное решение задачи.

Сегодня МКЭ является мощным инструментом инженерного анализа и физических исследований благодаря созданию пакетов компьютерных программ, таких как ANSYS, MSC.NASTRAN, MSC.MARC, COSMOS, ABAQUS, которые не только реализуют вычислительный процесс МКЭ, но и имеют удобный интерфейс для ввода исходных данных, контроля процесса вычислений и обработки результатов расчёта.

Из переведённых на русский язык зарубежных работ по МКЭ и его применению отметим книги Зенкевича, Бате К., Галлагера Р., Норри Д. и Де Фриза Ж., Сегерлинда Л., Стренга Г. и Фикса Дж., Дж. Одена.

Среди отечественных публикаций по МКЭ можно выделить книги и статьи Постнова В.А., Розина Л.А., Синицина Ф.П., Городецкого А.С., Образцова И.Ф.

Метод конечных элементов (МКЭ) позволяет численно решать широкий спектр физических проблем. В пособии рассматриваются

только задачи деформирования изотропного линейно-упругого тела. Используется формулировка МКЭ в виде метода перемещений, где искомыми считаются упругие перемещения деформированного тела.

6.1. Дискретизация. Конечные элементы. Узлы

Деформируемое тело (конструкция) разбивается на конечные элементы (рис. 6.1). Конечные элементы могут иметь различную форму и различные размеры. В результате разбивки создаётся сетка из границ элементов. Пересечения этих границ образуют узлы. На границах и внутри элементов могут быть созданы дополнительные узловые точки. Ансамбль из всех конечных элементов и узлов является основой конечно-элементной модели деформируемого тела. Дискретная модель должна достаточно хорошо покрывать область исследуемого объекта.

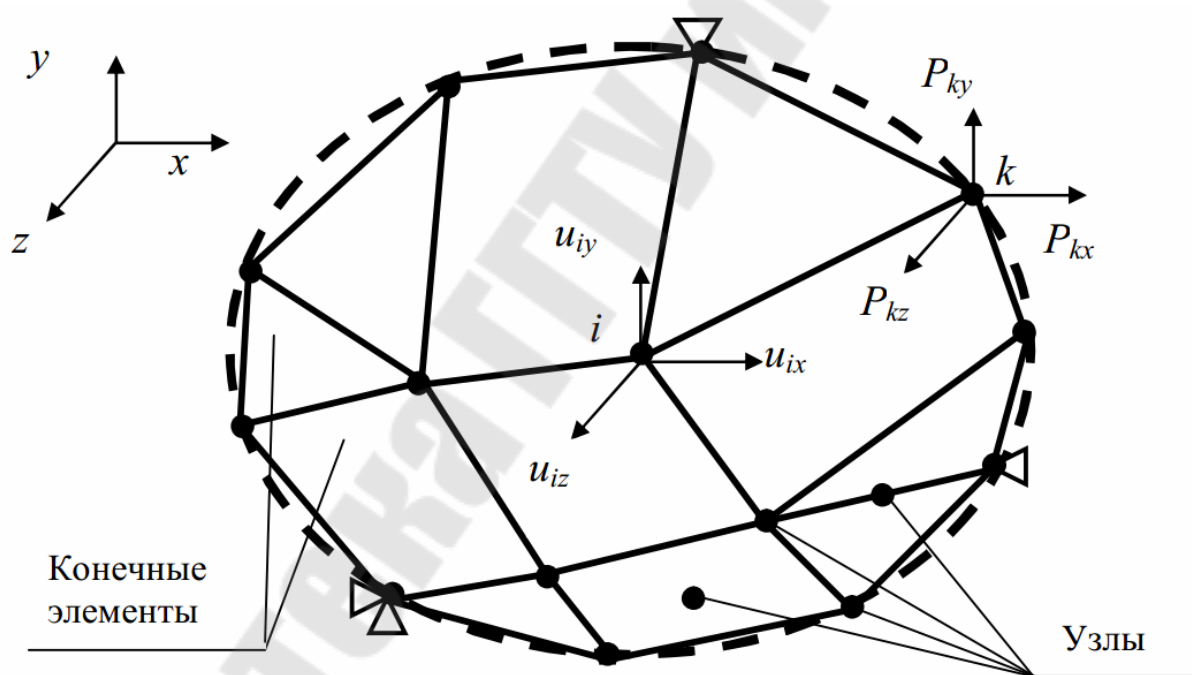


Рис. 6.1. Конечно-элементная модель

Выбор типа, формы и размера конечного элемента (КЭ) зависит от вида напряжённо-деформированного состояния, формы и нагрузки исследуемого тела. Стержневой КЭ применяется для моделирования одноосного напряжённого состояния при растяжении-сжатии, а также в задачах о кручении или изгибе. Плоский (двумерный) КЭ в виде,

например, треугольной или четырёхугольной пластины используется для моделирования плоского напряжённого или плоского деформированного состояния. Объёмный (трёхмерный) КЭ в виде, например, тетраэдра, шестигранника или призмы служит для анализа объёмного напряжённого состояния. КЭ в форме кольца применяется в случае осесимметричного напряжённого состояния. Для расчёта изгиба пластины берётся соответствующий плоский КЭ, а для расчёта оболочки используется оболочечный КЭ. В тех зонах деформируемого тела, где ожидаются большие градиенты напряжений, нужно применять более мелкие КЭ или элементы большего порядка.

Конечные элементы наделяются различными свойствами, которые задаются с помощью констант и выбора нужных математических соотношений. Например, для стержневого ферменного КЭ указывается площадь поперечного сечения, а если ферменный КЭ двумерный, то корректируется содержание соответствующих матриц. Задаваемые свойства материала КЭ должны отражать физические условия деформирования. Кроме упругих свойств – модуля упругости и коэффициента Пуассона, - если необходимо, должны вводиться коэффициент теплового расширения, плотность и другие физические характеристики.

Все элементы и узлы нумеруются. Нумерация узлов бывает общей (глобальной) для всей конечно-элементной модели и местной (локальной) внутри элементов. Нумерацию элементов и общую нумерацию узлов желательно производить так, чтобы трудоёмкость вычислений была наименьшей. Существуют алгоритмы оптимизации этой нумерации. Должны быть определены массивы связей между номерами элементов и общими номерами узлов, а также между местными и общими номерами узлов.

6.2. Системы отсчёта. Степени свободы

Состояние деформированного тела характеризуется конечным числом независимых параметров, определённых в узлах конечно-элементной сетки. Такие параметры называются обобщёнными координатами, или степенями свободы. В рассматриваемых ниже задачах в качестве степеней свободы применяются перемещения узлов, среди компонентов которых могут быть и угловые перемещения.

Степени свободы, координаты узлов, перемещения произвольных точек элементов, силы и другие объекты могут определяться в различных системах отсчёта – системах координат. В алгоритме МКЭ

используются общая (глобальная) система координат, привязанная ко всей конечно-элементной модели (см. рис. 6.1), и местные (локальные) системы координат, связанные с конкретными конечными элементами, в силу чего их называют элементными системами координат. Переход от одной системы координат к другой производится с помощью матриц преобразования.

Число степеней свободы одного узла зависит от типа задачи. На рис. 6.1 показан узел i , имеющий в общей системе координат x, y, z три степени свободы, которым соответствует вектор перемещений узла:

$$U_i = \{U_i\} \begin{Bmatrix} u_{ix} \\ u_{iy} \\ u_{iz} \end{Bmatrix} \quad (6.1)$$

Если узел i имеет n_i степеней свободы, а конечный элемент включает n_e узлов, то число степеней свободы одного элемента равно $n_e \times n_i$. Число степеней свободы всей модели, имеющей n однотипных узлов, равно:

$$N = n_e \times n_i.$$

Набору всех степеней свободы модели соответствует общий (глобальный) вектор узловых перемещений модели, в котором нумерация перемещений может быть общей (глобальной) или по номерам узлов с добавлением индекса узловой степени свободы:

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_q \\ \vdots \\ u_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_i \\ \vdots \\ U_n \end{Bmatrix}, \quad (6.2)$$

где U_i – подматрица, составленная из всех n_i компонентов перемещения узла i , в частности, для трехмерной задачи при использовании общей декартовой системы координат x, y, z эта подматрица является вектором перемещений узла (6.1). Переход от узловой к общей

нумерации очевиден. Например, для рассмотренного выше случая трёх степеней свободы в узле:

$$u_{ix} = u_{3i-2}; u_{iy} = u_{3i-1}; u_{iz} = u_{3i}.$$

6.3. Аппроксимация искомой функции с помощью функции формы

Искомая функция – поле перемещений точек деформированного тела аппроксимируется с помощью множества кусочно-непрерывных функций, называемых функциями формы. Каждая функция формы отлична от нуля только в области одного «своего» конечного элемента, принимает значение 1 в одном узле этого элемента и равна нулю во всех других узлах. Такой выбор аппроксимирующих функций позволяет интерполировать вектор перемещения произвольной точки элемента $\{U(x)\}_e$ через вектор узловых перемещений элемента $\{U\}_e$ в виде сумм:

$$\{U(x)\}_e = [N(x)]_e \{U\}_e \quad (6.3)$$

где x – набор координат, определяющих положение точки в элементе, $[N(x)]_e$ – матрица функций формы элемента.

Рассмотрим в качестве примера аппроксимацию скалярной одномерной функции $u(x)$ на интервале $[AB]$ (рис. 6.2).

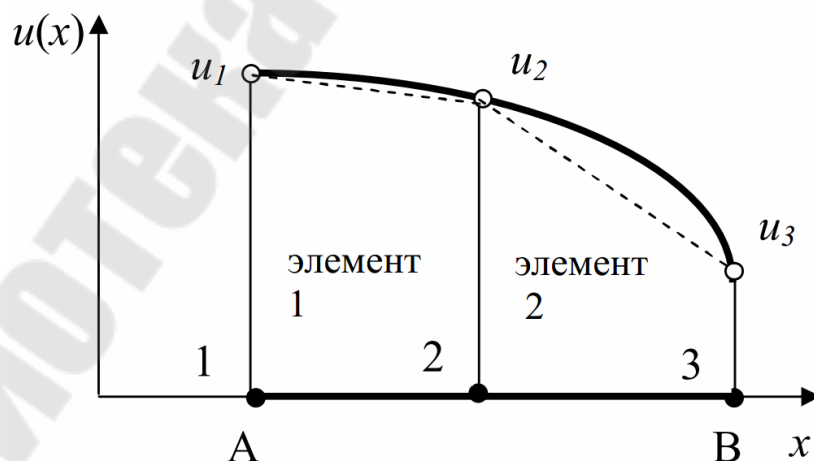


Рис. 6.2. Аппроксимация функции

Разобьём заданный интервал на два элемента с узлами 1-2 и 2-3. Узловые значения функции $u(x)$ образуют общий вектор

$$\{U\} = \{u_1 \ u_2 \ u_3\}^T$$

Для первого элемента аппроксимирующую функцию (полеую функцию) примем в виде полинома первой степени, то есть в виде линейной зависимости:

$$u_1(x) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x,$$

в матричной форме это выражение будет иметь вид:

$$u_1(x) = [X]\{\alpha\}_1 \quad (6.4)$$

где $[X] = [1 \ x]$, $\{\alpha\}_1 = \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{Bmatrix}$.

В узлах первого элемента зависимость (6.4) даст два равенства:

$$u_1 = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x_1, \quad u_2 = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x_2,$$

в матричной форме это выражение будет иметь вид:

$$\{u\}_1 = [A]\{\alpha\}_1 \quad (6.5)$$

где $\{u\}_1 = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}$, $[A]_1 = \begin{Bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \end{Bmatrix}$,

Из (6.5) вытекает

$$\{\alpha\}_1 = [A]_1^{-1} \{u\}_1.$$

Подставив это выражение в (6.4), получим:

$$u_1(x) = [N]_1 \{u\}_1, \quad (6.6)$$

где $[N]_1 = [X][A]_1^{-1} = [N_1^1 \ N_2^1]_1$ – матрица функций формы для первого элемента. Функции формы первого элемента:

$$N_1^1 = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}, \quad N_2^1 = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \quad (6.7)$$

Легко вычислить: $N_1^1(x_1) = 1$, $N_1^1(x_2) = 0$, $N_2^1(x_1) = 0$, $N_2^1(x_2) = 1$, $N_1^1 + N_2^1 = 1$.

Аналогично выражаются перемещения второго элемента:

$$u_2(x) = [N]_2 \{u\}_2, \quad (6.8)$$

где $\{u\}_2 = \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix}$, $[N]_2 = [N_2^2 \quad N_3^2]_2$ – матрица функций формы второго элемента.

Функции формы второго элемента:

$$N_2^2 = \frac{x_3 - x}{x_3 - x_2}, \quad N_3^2 = \frac{x - x_2}{x_3 - x_2}. \quad (6.9)$$

На общей границе элементов в узле 2 аппроксимирующая функция остаётся непрерывной благодаря равенству $u_1(x_2) = u_2(x_2) = u_2$.

Выше были построены одномерные конечные элементы, имеющие линейные функции формы. Конечные элементы с линейной аппроксимацией называются элементами первого порядка или симплекс-элементами.

Представим весь интервал $[AB]$ как один одномерный конечный элемент с тремя узлами. Тогда для аппроксимации функции $u(x)$ можно использовать полином второй степени:

$$u(x) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot x^2. \quad (6.10)$$

Преобразования, аналогичные вышеприведенным, дают выражение:

$$u(x) = [N_1 \quad N_2 \quad N_3] \{u\}, \quad (6.11)$$

$$\text{где } N_1 = \frac{(x-x_2)(x-x_3)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)}, \quad N_2 = \frac{(x-x_1)(x-x_3)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)}, \quad N_3 = \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)} \quad (6.12)$$

– квадратичные функции формы. Такой элемент называется одномерным квадратичным, или одномерным элементом второго порядка.

Для некоторых типов конечных элементов функции формы легко определяются с помощью полинома Лагранжа:

$$N_i^e = L_i^{n_e} = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n_e} \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \quad (6.13)$$

Применительно к анализируемым выше одномерным конечным элементам первого и второго порядков полином Лагранжа даёт те же выражения (6.7), (6.9), (6.12).

Обобщая рассмотренные примеры аппроксимации перемещений, видим, что степень полиномов, используемых в качестве функций формы, определяет порядок конечного элемента. Выбор порядка аппроксимации накладывает определённые условия на количество узлов элемента.

Для многих типов конечных элементов функции формы и другие соотношения МКЭ эффективно определяются в местных естественных системах координат.

6.4. Уравнения жёсткости конечного элемента

Принимается, что конечные элементы взаимодействуют только через общие узлы. Внутренние силы, действующие на элемент e , заменяются статически или энергетически эквивалентными узловыми силами, составляющими вектор узловых сил элемента $\{F\}_e$. Внешние распределённые массовые и поверхностные силы, действующие на конечный элемент, приводятся к статически или энергетически эквивалентным узловым силам, образующим векторы $\{P\}_e^g$ и $\{P\}_e^q$. К эквивалентным узловым силам приводятся также силы инерции и начальные деформации, в том числе температурные деформации.

Составляется матричное уравнение жёсткости элемента:

$$[K]_e \{U\}_e = \{F\}_e + \{P\}_e^g + \{P\}_e^q, \quad (6.14)$$

где $[K]_e$ – матрица жесткости элемента, состоящая из коэффициентов жесткости, $\{U\}_e$ – вектор узловых перемещений элемента

Обоснование уравнения (6.14) может проводиться прямым методом с помощью теории упругости или сопротивления материалов, но этот подход имеет ряд недостатков. Более эффективными и во многих случаях более корректными способами обоснования уравнений жёсткости элементов являются вариационные методы и методы невязок.

Заметим, что вариационные методы позволяют получать общую систему уравнений равновесия всей модели без введения узловых сил $\{F\}_e$, то есть без предположения о взаимодействии элементов только через узлы и без составления соотношений жёсткости элементов (6.14). Однако в вычислительном процессе МКЭ удобно вначале определять матрицы элементов $[K]_e$, $\{P\}_e^q$ и $\{P\}_e^g$, а затем из них собирать общие матрицы системы уравнений равновесия модели по стандартным правилам.

В динамических задачах на основании принципа Даламбера в уравнения (6.14) добавляются узловые силы, эквивалентные массовым силам инерции.

6.5. Составление общей системы уравнений равновесия всей модели

С помощью вариационных принципов или методов невязок, применяемых ко всей конечно-элементной модели, а в прямом методе из условий равновесия узлов модели составляется общая система уравнений равновесия всей конечно-элементной модели исследуемого деформируемого тела. Для статических задач она имеет следующий вид:

$$[K]\{U\} = \{P\} + \{P\}^g + \{P\}^q. \quad (6.15)$$

Здесь $[K]$ – общая (глобальная) матрица жёсткости конечно-элементной модели, в которой компоненты являются коэффициентами жёсткости модели и вычисляются путём суммирования соответствующих коэффициентов жёсткости конечных элементов; индексация компонентов этой матрицы должна соответствовать индексации компонентов общих векторов узловых перемещений и сил.

$\{P\}$ – вектор заданных внешних узловых сил, в котором нумерация компонентов может быть общей (глобальной), то есть по общим номерам степеней свободы модели, или по общим номерам узлов с добавлением индекса узловой степени свободы, как у общего вектора узловых перемещений (6.2):

$$\{P\} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_s \\ \vdots \\ P_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_i \\ \vdots \\ P_n \end{Bmatrix}, \quad (6.16)$$

где $\mathbf{P}_i = \{P_i\}$ – подматрица из n_i компонентов силы, приложенной в узле i , например, для трехмерной задачи $\{P_i\} = \{P_{ix} P_{iy} P_{iz}\}^T$.

$\{P\}^q, \{P\}^g$ – общие (глобальные) векторы узловых сил, эквивалентных распределённым поверхностным и массовым силам, они собираются из компонентов соответствующих элементных векторов, их структура такая же, как у вектора $\{P\}$.

В динамических задачах на основании принципа Даламбера в выражения (6.15) добавляются силы инерции. Так как силы инерции выражаются через ускорения, которые являются вторыми производными от перемещений, то уравнения равновесия (6.15) превращаются в дифференциальные уравнения движения. С помощью этих уравнений выполняются различные виды динамического анализа:

- модальный анализ, где определяются собственные частоты и формы конструкции;
- гармонический анализ, где определяется отклик системы на внешнюю периодическую силу с различной частотой;
- полный анализ динамического процесса, где производится интегрирование дифференциальных уравнений движения.

6.6. Задание граничных условий

Силовые граничные условия учитываются общими векторами узловых сил $\{P\}, \{P\}^q$, входящими в правую часть уравнения (6.15).

Граничные условия в перемещениях (связи) могут учитываться как при формировании матриц элементов, так и после сборки общих матриц модели. Рассмотрим второй случай, который чаще используется в практике МКЭ.

Задание перемещений реализуется через задание узловых перемещений. Это равносильно понижению числа степеней свободы модели и может учитываться путём удаления из общей системы уравнений равновесия строчек-уравнений, соответствующих связанным степеням свободы. В результате изменяется размерность матриц разрешающей системы уравнений. Для статических задач чаще применяется

ся другой подход, при котором размерность матриц не изменяется. Заданные перемещения и, в частности, закрепления, т.е. нулевые перемещения, учитываются путём преобразования матриц $[K]$ и $\{P\}$. Применяются два способа.

Предположим, что задано узловое перемещение $u_q = u$ (в частности $u_q = 0$) для q -той степени свободы.

1-й способ преобразования матриц

Все компоненты q -того столбца и q -той строки матрицы жесткости $[K]$, кроме диагонального, приравниваются нулю: $K_{sq} = K_{qs} = 0, s \neq q, s, q = 1, \dots, N$. Сумма компонентов P_q, P_q^q и P_q^s векторов $\{P\}, \{P\}^q, \{P\}^s$ заменяется произведением $K_{qq}u$, все другие компоненты вектора $\{P\}$ заменяются на разности $P_s - K_{sq}u$.

2-й способ преобразования матриц

Диагональный компонент K_{qq} матрицы жесткости $[K]$ умножается на большое число, например $10^8 K_{qq}$, соответствующая сумма компонентов $P_q + P_q^q + P_q^s$ векторов $\{P\}, \{P\}^q, \{P\}^s$ заменяется на $10^8 K_{qq}u$.

В статических задачах задаваемые перемещения – связи должны исключать возможность перемещения нагруженной конструкции как абсолютно твёрдого тела. Только в этом случае разрешающая система уравнений (6.15) после учёта граничных условий будет иметь единственное решение. Исходная же система (6.15) до учёта связей имеет линейно зависимые уравнения, определитель её матрицы жёсткости равен нулю, следовательно, матрица жёсткости свободного тела сингулярная (особенная) и нельзя найти однозначного решения для узловых перемещений. Эта математическая особенность отражает физический факт, что действующие на свободное тело силы в статических задачах не определяют однозначно его перемещения из-за неопределённости смещения как твёрдого тела.

6.7. Решение общей системы уравнений равновесия конечно-элементной модели

Общая система уравнений равновесия (6.15), полученная МКЭ для линейно упругой модели тела, является с математической точки зрения системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). После учета правильно наложенных связей, не допускающих движения модели как абсолютно твёрдого тела, определитель матрицы $[K]$ не равен нулю и, следовательно, существует единственное решение – общий вектор узловых перемещений $\{U\}$. Точность и эффективность

различных способов решения СЛАУ (6.15) во многом зависит от структуры и свойств матрицы $[K]$: размера, обусловленности, симметричности, заполненности и др.

Известные алгоритмы решения СЛАУ можно разделить в основном на две группы: прямые методы и итерационные методы.

Прямые («точные») методы позволяют получать с помощью конечного числа операций точные значения неизвестных, если коэффициенты и правые части уравнений заданы точно и нет округлений при вычислениях. Среди множества прямых методов наибольшее применение имеют: метод исключения неизвестных Гаусса, метод квадратного корня, а также их разновидности, в частности, фронтальный метод и схема разложения Холецкого.

Итерационные методы характеризуются тем, что вначале задаются некоторыми приближёнными значениями неизвестных. Затем с помощью каких-либо алгоритмов их последовательно уточняют, приближаясь к точному решению. Наиболее часто используются метод прямой итерации, метод Гаусса-Зейделя, метод последовательной верхней релаксации, градиентные методы наискорейшего спуска и сопряжённых градиентов.

6.8. Анализ результатов решения

После определения общего вектора узловых перемещений $\{U\}$ находят элементные векторы узловых перемещений $\{U\}_e$. Через них путём интерполяции с помощью функций формы вычисляются перемещения любых точек элементов.

Для стержневых элементов по известным векторам $\{U\}_e$ из уравнений (6.14) находят вектора $\{F\}_e$, а затем методами сопротивления материалов вычисляют внутренние силы, моменты и напряжения.

Для плоских и объёмных элементов, дифференцируя аппроксимирующие функции перемещений внутри элементов, находят деформации и по закону Гука вычисляют напряжения.

Для конечных элементов первого порядка с линейной интерполяцией перемещений величины деформаций и напряжений внутри элементов получаются постоянными, следовательно, на межэлементных границах эти результаты будут иметь разрывы. Для квадратичных элементов, а также для элементов более высокого порядка с нелинейной интерполяцией перемещений величины деформаций и напряжений внутри элементов изменяются. Обычно они вычисляются

приблизённо в точках интегрирования Гаусса, а затем экстраполируются на узлы и интерполируются к центру тяжести элемента. На границах элементов при таком подходе поля деформаций и напряжений имеют конечные разрывы. С целью уточнения результатов вычислений применяют различные способы усреднения. Например, в выбранном узле берут среднюю величину узловых значений напряжений, найденных для всех элементов, примыкающих к этому узлу. Более точные результаты получаются с помощью теории сопряжённой аппроксимации.

Реакции опор вычисляют из соответствующих уравнений общей системы (6.15), взятой до её модификации, учитывающей связи. Используя глобальную нумерацию компонентов векторов узловых сил, можно записать следующую формулу для реакций в опорных узлах:

$$P_s = \sum_{q=1}^N K_{sq} - P_s^g - P_s^q .$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Ревяко, М. М. Расчет и конструирование пластмассовых изделий и форм : учеб. для студентов учреждений высшего образования по специальности «Химическая технология органических веществ, материалов и изделий» / М. М. Ревяко, О. М. Касперович. – Минск : БГТУ, 2012. – 432 с.

2. Мишин В. М. Управление качеством: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Менеджмент организации» / В. М. Мишин. 2–е изд., перераб. и доп. Москва: Юнити–Дана, 2005. 463 с.

3. Семенов А.Н. Технологичность конструкции изделия машиностроения. – Рыбинск: РГАТУ имени П.А. Соловьева, 2016. – 217 с.

4. Единая система конструкторской документации. Текстовые документы: ГОСТ 2.106-96. – Взамен ГОСТ 2.106-68; введ. РБ 01.10.1997. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1997. – 36 с.

5. Единая система конструкторской документации. Виды изделий: ГОСТ 2.101-2016. – Взамен ГОСТ 2.101-68; введ. РБ 01.01.2019. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2016. – 16 с.

6. Единая система конструкторской документации. Виды и комплектность конструкторских документов: ГОСТ 2.102-2013. – Взамен ГОСТ 2.102-68; введ. РБ 01.01.2019. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2013. – 20 с.

7. Остряков, Ю.А. Проектирование механизмов и машин: эффективность, надежность и техногенная безопасность: учеб. пособие / Ю.А. Остряков, И.В. Шевченко. – М.: ИНФРА–М, 2016. – 260 с.

8. Технологические методы обеспечения надежности деталей машин: учеб. пособие / И.М. Жарский [и др.]. – Мн.: Выш. шк., 2006. – 299 с: ил.

9. Фокин, В.Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твердого тела: Учеб. пособие / В.Г. Фокин. – Самара: Самар. гос. техн. ун–т, 2010. – 131 с.: ил.

10. Детали машин. Учебник для ВУЗов / Л.А. Андриенко, Б.А. Бойков, И.К. Ганулич и др.; под ред. О.А. Ряховского. – М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 520 с.

11. Иванов М.Н. Детали машин : учебник для вузов / М. Н. Иванов; под ред. В.А. Финогенова. - 6-е изд., перераб. – М.: Высш. школа, 2000. – 408с.
12. Леликов О.П. Основы расчёта и проектирования деталей и узлов машин. Конспект лекций по курсу «Детали машин». – М.: Машиностроение, 2004. – 440 с.
13. Решетов Д.Н. Детали машин : учебник для машиностр. спец. вузов. - 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 496с.
14. Скойбеда А.Т. И др. Детали машин и основы конструирования : учебник для вузов / под общ. ред. А. Т. Скойбеды. - 2-е изд., перераб. – Мн.: Выш. шк., 2006. – 560 с.
15. Биргер И.А. Расчёты на прочность деталей машин/ Б.Ф. Шор, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 618 с.
16. Иванов М.Н. Волновые зубчатые передачи / М.Н. Иванов. – М.: Высшая школа, 1988. – 368 с.
17. Кудрявцев В. Н. Детали машин : учебник для студ. машиностр. спец. вузов / В.Н. Кудрявцев. – Л.: Машиностроение, 1980. – 464 с.
18. Олофинская В. П. Детали машин : краткий курс и тестовые задания / В. П. Олофинская. – 2-изд., испр. и доп.. – М.: Форум, 2010. – 207 с.
19. Учаев П.Н. Детали машин и основы конструирования. Основы конструирования. Вводный курс: учебник для вузов / П. Н. Учаев, С. Г. Емельянов, С.П. Учаева; под общ. ред. П.Н. Учаева. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 199 с.
20. Хруничева Т.В. Детали машин: типовые расчёты на прочность: учеб. пособие. – М.: ИД Форум, Инфра-М, 2009. – 224 с.
21. Родионов, Ю.В. Детали машин и основы конструирования: краткий курс: учебное пособие / Ю.В. Родионов, Д.В. Никитин, В.Г. Однолько; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет». – Тамбов: Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2017. – Ч. 2. – 89 с.: ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=499042>. – Библиогр.: с. 77. – ISBN 978-5-8265-1728-4. – Текст: электронный.
22. Никитин, Д.В. Детали машин и основы конструирования: учебное пособие / Д.В. Никитин, Ю.В. Родионов, И.В. Иванова; Ми-

нистерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет». – Тамбов: Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – Ч. 1. Механические передачи. – 113 с.: ил., табл., схем. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=444963>. – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-8265-1391-0 (общ.). - ISBN 978-5-8265-1398-9 (Ч. 1). – Текст: электронный.

23. Детали машин и основы конструирования: учебное пособие/ В.В. Воробьев, А.Д. Ковергин, Ю.В. Родионов и др.; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет». – Тамбов: Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. – 172 с.: ил., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=278004>. – Библиогр.: с. 152. – Текст: электронный.

24. Усманов Р.А. Расчёт и конструирование деталей машин: тексты лекций / Р.А. Усманов; Министерство образования и науки России, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет». – Казань: Казанский научно-исследовательский технологический университет, 2014. – 168 с.: табл., схем., ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=428795>. – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-7882-1645-4. – Текст: электронный.

25. Леонова О.В. Детали машин и основы конструирования: сборник задач / О.В. Леонова, К.С. Никулин; Московская государственная академия водного транспорта. – Москва: Альтаир: МГАВТ, 2015. – 130 с.: ил., табл., схем. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=429852>. – Библиогр. в кн. – Текст: электронный.

Поздняков Евгений Петрович

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ИЗДЕЛИЙ

ПОСОБИЕ

**для студентов на первой ступени
высшего образования специальности
1-36 07 02 «Производство изделий на основе
трехмерных технологий»
дневной формы обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 11.03.22.

Рег. № 70Е.

<http://www.gstu.by>