

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«МИСиС»

Новотроицкий филиал

С.А. Иванов

А.В. Нефедов

Н.А. Чиченев

## **Проектирование и оптимизация конструкций машин и оборудования**

Рекомендовано учебно-методическим объединением вузов  
по образованию в области металлургии  
в качестве учебника

Новотроицк, 2014

**Рецензенты:**

**Веселовский А.А.**, доцент кафедры технологии машиностроения  
Орского гуманитарно-технологического института (филиала) ОГУ, к.т.н;

**Казаев А.Б.**, директор ремонтного завода ОАО «Уральская Сталь».

**Иванов, С.А.**

Проектирование и оптимизация конструкций машин и оборудования :  
учебник для вузов / С.А. Иванов, А. В. Нефедов, Н. А. Чиченев, –  
Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2014. – 200с.- ISBN 978-5-903472-14-7

Приведены сведения по принципам, методике проектирования и оптимизации конструкций машин и оборудования промышленного назначения, дано систематизированное представление о характере и последовательности действий в процессе проектирования, начиная от поступления заказа на проект до оформления рабочей документации. Рассмотрены приёмы конструирования на основе унификации и стандартизации, снижения металлоёмкости, повышения прочности и жёсткости конструкций, а также их экономичности.

Учебник предназначен для студентов, обучающихся по специальности 150404 «Металлургические машины и оборудование» и направлениям подготовки бакалавров 150400 «Металлургия» и 151000 «Технологические машины и оборудование».

**Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСиС».**

**ISBN 978-5-903472-14-7**

© ФГАОУ ВПО Национальный  
исследовательский  
технологический университет  
«МИСиС» Новотроицкий филиал,  
2014

© С.А. Иванов, А.В. Нефёдов, Н.А.  
Чиченев, 2014

# СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	5
Условные обозначения.....	6
Введение.....	8
1. Методы проектирования.....	10
1.1. Общие сведения.....	10
1.2. Эвристические методы.....	11
1.3. Экспериментальные методы.....	24
1.4. Формализованные методы.....	26
1.5. Методы конструирования.....	27
2. Методология проектирования.....	37
2.1. Принципы проектирования оборудования.....	37
2.2. Этапы проектирования оборудования.....	43
2.3. Конструкторская документация.....	49
2.4. Научная документация. Научно-исследовательский отчёт.....	60
2.5. Автоматизация оформления документации.....	63
2.6. Основные направления повышения качества машин.....	65
2.7. Повышение качества машин при проектировании.....	70
2.8. Повышение качества машин при изготовлении.....	73
2.9. Повышение качества машин при эксплуатации.....	75
2.10. Экономический подход к проектированию машин.....	80
3. Качественные показатели машин.....	85
3.1. Причины нарушения работоспособности машин.....	85
3.1.1. Виды повреждений при силовом воздействии.....	85
3.1.2. Виды повреждений при изнашивании.....	88
3.1.3. Виды повреждений при температурном воздействии.....	91
3.1.4. Виды повреждений при коррозии.....	93
3.1.5. Меры по повышению долговечности машин.....	94
3.2. Масса и металлоёмкость конструкции.....	98

3.2.1. Показатели удельной массы и металлоёмкости.....	98
3.2.2. Рациональные сечения.....	100
3.2.3. Удаление металла из мало напряжённых участков.....	101
3.2.4. Влияние галтелей, скосов и конусов.....	108
3.2.5. Листовые штампованные конструкции.....	109
3.2.6. Повышение прочностных характеристик материалов.....	111
3.3. Прочность деталей, узлов и соединений.....	116
3.3.1. Равнопрочность деталей.....	116
3.3.2. Равнопрочность узлов и соединений.....	122
3.3.3. Контактная прочность.....	123
3.3.4. Температурные напряжения и деформации.....	129
3.3.5. Сопротивление усталости.....	136
3.4. Жёсткость деталей и узлов.....	149
3.4.1. Критерии жёсткости .....	149
3.4.2. Факторы, влияющие жёсткость конструкции.....	152
3.4.3. Удельные показатели жёсткости.....	154
3.4.4. Способы повышения жёсткости при конструировании...	157
3.5. Патентно-правовые показатели.....	166
4. Конструирование узлов и деталей.....	169
4.1. Технологичность конструкции.....	169
4.2. Устранение подгонки.....	172
4.3. Устранение и уменьшение изгиба.....	174
4.4. Равнонагруженность опор.....	177
4.5. Принцип самоустанавливаемости.....	179
4.6. Осевая фиксация деталей.....	184
4.7. Конструирование литых деталей.....	186
Библиографический список.....	199

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Повышение эффективности производства металлопродукции во многом зависит от эффективных технологий металлургического производства и применяемого для их осуществления механического оборудования. Поэтому подготовка специалистов в области металлургических машин и оборудования является стратегически важной задачей, необходимой для обеспечения национальной безопасности страны.

Дисциплина «Проектирование и оптимизация конструкций машин и оборудования» предусмотрена государственным образовательным стандартом и учебными планами высших учебных заведений, ведущих подготовку специалистов по специальности 150404 «Металлургические машины и оборудование».

В основу настоящего учебника положены лекции, которые более 10 лет читаются авторами в Новотроицком филиале Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» для студентов, обучающихся по специальности 150404 «Металлургические машины и оборудование» и направлениям подготовки бакалавров 150400 «Металлургия» и 151000 «Технологические машины и оборудование».

Учебник предназначен для студентов, обучающихся по профилю 150404 «Металлургические машины и оборудование», направления 150400 «Технологические машины и оборудование», и преподавателей ведущих занятия по данной дисциплине. Может быть полезен студентам других профилей, входящих в направление 151000 «Технологические машины и оборудование», а также студентам, обучающимся по направлению 150400 «Металлургия».

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$A$  – площадь

$B, b$  – ширина

$C$  – общее название коэффициентов

$D, d$  – диаметр

$E$  – модуль упругости материала

$F$  – сила

$f$  – прогиб

$G$  – модуль упругости при сдвиге и кручении

$G$  – масса

$g$  – удельная масса

$H, h$  – высота

$I$  – момент инерции сечения

$K, k$  – общее обозначение коэффициентов

$L, l$  – длина

$M$  – момент

$m$  – масса

$m$  – модуль зацепления

$N$  – число циклов

$P$  – мощность

$R, r$  – радиус

$R$  – коэффициент асимметрии цикла

$S$  – запас прочности

$s$  – зазор

$T$  – температура

$t$  – время

$\mu$  – коэффициент податливости

$V$  – объём

$W$  – момент сопротивления сечения

$\alpha$  – коэффициент линейного расширения

$\varepsilon$  – относительная деформация

$\varepsilon_k$  – коэффициент масштабного фактора

$\lambda$  – коэффициент жёсткости

$\nu$  – показатель удельной металлоёмкости

$\rho$  – плотность

$\sigma$  – нормальное напряжение

$\tau$  – касательное напряжение

$\varphi$  – угловая деформация при кручении

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Проектирование и оптимизация конструкций машин и оборудования» изучается в цикле специальных (профильных) дисциплин. Основная задача предлагаемого учебника – дать студентам представление о проектировании машин и оборудования металлургического производства, научить методам и приемам, которые используются при разработке рациональных конструкций различного оборудования в машиностроении.

Проектирование является одним из главных видов деятельности человека. Оно охватывает все области деятельности человека (науку, технику, искусство) и обеспечивает прогресс всего общества. Большое разнообразие создаваемых конструкций машин и оборудования требует не только теоретических знаний во всех областях науки и техники, но и практических навыков проектирования.

Ценную основу конструкторского проекта представляет интеллектуальная собственность разработчика, предприятия, которая может продаваться и покупаться. Интеллектуальная собственность – это мысли, идеи, воплощенные в проекте машины. В этой связи особое значение приобретает патентная способность и патентная чистота, воплощенные в технических решениях при разработке проекта машины.

Проектирование, в отличие от многих других видов творчества, не является пассивным ожиданием озарения. Оно требует активного участия в процессе создания конкретного объекта (устройства), поиска и выбора путей решения поставленной задачи.

Различают следующие фазы «жизни» машины: проектирование, изготовление, сборка, монтаж, наладка, эксплуатация, модернизация, демонтаж и утилизация.

Процесс проектирования машины состоит из следующих этапов:

- обоснование необходимости создания новой машины;
- прогнозирование развития параметров машины;

- научно-технические исследования;
- разработка конструкторской документации;
- разработка технологической документации;
- изготовление, испытание и доводка опытных образцов.

Необходимость создания современной машины вытекает из экономической, социальной или оборонной потребности с учётом общих условий развития техники применительно к конкретному случаю. В ходе разработки обоснования необходимо учесть не только требования текущего момента, но и возможность изменения технологии в будущем, определяющей потребность в таких машинах, а также факторы, влияющие на развитие техники в данном направлении. Недостаточное внимание к этим вопросам может привести к тому, что к моменту создания новой машины потребность в ней отпадёт.

# 1. МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

## 1.1. Общие сведения

Проектирование подразумевает использование определенных методов, основанных на тех или иных законах природы.

*Метод* – это приём или способ действия с целью достижения необходимого результата. Его выбор зависит не только от вида решаемой задачи, но и индивидуальных черт разработчика (его характера, организации мышления, склонности к риску, способности принимать решения и нести за них ответственность и т.п.), условий его труда и оснащённости средствами оргтехники. Сложность процесса проектирования, нестандартность проектных ситуаций вызывает необходимость знания и применения эвристических, экспериментальных и формализованных методов.

*Эвристические методы* основаны на подсознательном мышлении и характеризуются неосознанным (интуитивным) способом действий для достижения поставленных целей. Часто эвристические методы ещё называют *методами инженерного творчества*. Эвристические методы присущи только человеку и отличают его от искусственных интеллектуальных (мыслящих) систем. К сфере человеческой деятельности при проектировании относят: постановку задачи; выбор методов её решений и построение (разработка) моделей и алгоритмов; выдвижение гипотез и предложений; анализ результатов и принятие решений. Важной особенностью именно человеческой деятельности является наличие в ней элемента случайности, необъяснимые и сумасбродные решения часто лежат в основе оригинальных и неожиданных идей.

*Экспериментальные методы* основаны на использовании реальных объектов и физических моделей. Несмотря на сложность, только они позволяют получить наиболее достоверные и надежные исходные данные и результаты решений, служат основой для разработки других методов и

моделей. Однако следует отметить, что степень объективности результатов исследований зависит от грамотности постановки и проведения эксперимента и обработки его результатов.

*Формализованные методы* могут быть использованы при знании законов, лежащих в основе работы исследуемых объектов и процессов. Эти методы строятся на базе четких указаний посредством языка схем, математических формул, формально-логических отношений и алгоритмов. Главной их чертой является независимость получаемых результатов от индивидуальных черт человека. Задачи с полностью формализованным решением перестают интересовать человека, их относят к разряду рутинных.

Поскольку экспериментальные и формализованные методы используются человеком, то в них в той или иной степени присутствует элемент эвристики. Он может, как усиливать эффективность решения благодаря творческому началу, так и вносить ошибки и искажать результаты (осознано или неосознанно) в силу субъективности.

Эвристические методы оперируют понятиями и категориями (абстрактными, отвлечёнными, конкретными). Формализованные – конкретными параметрами или их группами. Экспериментальные – физическими объектами и их характеристиками.

Применение метода позволяет найти то или иное решение. Те из них, которые будут обладать высокими характеристиками и эффективностью, часто называют *сильными решениями*.

## **1.2. Эвристические методы**

Долгое время в основе творчества лежали методы проб и ошибок, перебора возможных вариантов, ожидания озарения. Так, Эдисон провел около 50 тысяч опытов, пока разрабатывал устройство щелочного аккумулятора. Изобретатель вулканизированной резины Чарльзе Гудьер смешивал сырую резину (каучук) с любым попадавшимся ему под руку

веществом: солью, перцем, сахаром, песком, касторовым маслом, даже с супом – следуя великолепному логическому заключению, что, рано или поздно, он перепробует всё, что есть на земле и, наконец, наткнётся на удачное сочетание.

Однако со временем такие методы начали приходить в противоречие с темпами создания и масштабами техники. Стали вырабатываться рекомендации, позволяющие более осознано подходить к проектированию, как к творческой деятельности. Наиболее интенсивно поиском новых методов занялись со второй половины XX века, посредством изучения приёмов и последовательности действий инженеров и других творческих работников.

В настоящее время практически на всех преуспевающих предприятиях, занятых созданием и производством материальной и нематериальной (программы, методики) продукции, поиск новых идей и решений ведётся с помощью тех или иных эвристических методов. А для современного инженера знание этих методов становится столь же необходимым, как умение читать и писать. Даже журналисты, художники и представители других творческих профессий, кто нуждается в оригинальных идеях, активно используют такие методы.

Основными эвристическими методами проектирования являются следующие методы: итераций или последовательных приближений, декомпозиции, контрольных вопросов, мозговой атаки, морфологического анализа, а также методы теории решения изобретательских задач (ТРИЗ).

#### **Метод итераций (последовательного приближения).**

Процесс проектирования ведётся в условиях информационного дефицита, который проявляется в следующем:

- невозможность заранее точно указать условия работы проектируемого объекта, не зная его конкретного вида и устройства (исходные данные зависят от вида конечного решения);

– выявление в процессе проектирования противоречивых исходных данных, т.е. невозможность достижения технического решения при предложенных данных, оказавшихся взаимоисключающими;

– появление в процессе проектирования необходимости учёта дополнительных условий и ограничений, которые ранее считались несущественными;

– перераспределение по степени важности показателей качества, так как может выясниться, что показатель, ранее считавшийся второстепенным, очень важен (и наоборот).

Такая неопределенность разрешается посредством выполнения итерационных процедур, т.е. комбинацией прямых действий (при предположительном виде исходных данных или ограниченном числе учитываемых факторов) и обратного движения с возвращением к предшествующим этапам (с уточненными значениями исходных данных и перечнем факторов). Число циклов итераций зависит от степени неопределенности начальной постановки задачи, её сложности, опыта и квалификации проектировщика. Часто начальное грубое приближение называют "нулевым", а последующие уточнения - соответственно "первым", "вторым" и т. д. приближениями.

Итерационный подход широко применяется в конструировании. Так, при разработке эскиза узла вначале детали и их расположение показывают предположительно, затем анализируют полученную конструкцию и вносят в него необходимые изменения (согласовываются формы и расположение поверхностей деталей, проверяется нормальное функционирование и т.д.). В процессе приближений возможно не только уточнение, но и отказ от первоначальных предположений.

В частном случае, когда нет никаких предположений по решению задачи, метод последовательных приближений можно сформулировать в виде совета: возьмите любое известное решение (идею, схему, данные и т. д.) в качестве исходного решения или предложите какое-нибудь другое решение

задачи. Теперь станет яснее, что вас не удовлетворяет, и что и в каком направлении надо улучшать.

### **Метод декомпозиции.**

Любую техническую систему можно рассматривать как сложную, состоящую из отдельных взаимосвязанных подсистем, которые, в свою очередь, также могут быть расчленены на части. Такой процесс расчленения системы называется *декомпозицией*. В качестве систем могут выступать не только материальные объекты, но и процессы, явления и понятия. Декомпозиция позволяет разложить сложную задачу на ряд простых, пусть и взаимосвязанных задач.

При декомпозиции руководствуются определенными правилами.

1. Каждое расчленение образует свой уровень. Исходная система располагается на нулевом уровне. После её расчленения получают подсистемы первого уровня. Расчленение этих подсистем или некоторых из них приводит к появлению подсистем второго уровня и т. д.

2. Система расчленяется только по одному, постоянному для всех уровней, признаку. В качестве такого признака может быть функциональное назначение частей, конструктивное устройство (материал и его термообработка, формы поверхностей и др.), структурные признаки (вид ступеней передач, способы фиксации деталей и др.). Так, выделение в составе прокатного стана подсистем клеть, валок, шпиндель и привод проводится в соответствии с функциональным признаком.

3. Вычленимые подсистемы в сумме должны полностью характеризовать систему, но при этом взаимно исключать друг друга. Например, если при перечислении подсистем прокатного стана пропустить, допустим, шпиндель, то функциональное взаимодействие остальных подсистем не обеспечит нормальное функционирование всей системы (прокатного стана) в целом. Недопустимо, чтобы одной из подсистем являлась сама система.

4. Глубина декомпозиции (степень подробности описания) и количество уровней определяются требованиями обзорности и удобства восприятия получаемой иерархической структуры, соответствия уровням знания работающему с ней специалисту.

Обычно: в качестве нижнего (элементарного) уровня подсистем берут такой, когда их описание доступно для оценки и понятно для исполнителя (руководителя группы людей или отдельного человека). Таким образом, иерархическая структура всегда субъективно ориентирована: для более квалифицированного специалиста она будет менее подробна.

Число уровней иерархии влияет на обзорность структуры: много уровней - трудно проследить связи между уровнями, мало уровней - возрастает число находящихся на одном уровне подсистем и сложно установить между ними связи. Обычно, в зависимости от сложности системы и требуемой глубины проработки, выделяют 3...6 уровней.

Например, разрабатывая привод, в качестве элементарного уровня можно взять зубчатые колёса, валы, подшипники, двигатель в целом. Хотя подшипники и двигатель являются сложными по устройству и трудоёмки в проектировании, но как готовые покупные изделия для разработчика они выступают, в виде элементарных частей. Если бы двигатель пришлось бы разрабатывать, то его, как сложную систему, было бы целесообразно декомпозировать.

Эвристический характер построения иерархической структуры проявляется, прежде всего, в выборе числа уровней и перечня составляющих их подсистем.

При разработке технических систем декомпозиция неразрывно связана с последующей *композицией*, т.е. сборкой и увязкой отдельных частей (подсистем) в единую систему с проверкой на реализуемость, совместимость (особенно подсистем, принадлежащих разным ветвям) и согласованность параметров. В процессе согласования может возникать потребность в новой, корректирующей декомпозиции.

Очень эффективным является совместное использование методов декомпозиции и последовательных приближений.

### **Метод контрольных вопросов.**

Суть метода заключается в ответе на специально подобранные по содержанию и определённым образом расставленные наводящие вопросы. Вдумчиво и, по возможности, полно отвечая на них, фиксируя основные положения ответов, например, на бумаге в виде ключевых слов, схем и эскизов, удастся всесторонне представить решаемую задачу, отыскать новые пути её решения. Контрольные вопросы, с одной стороны, подобны консультанту, в ненавязчивой форме предлагающему попробовать те или иные подходы и пути решения проблемы, а с другой стороны позволяют спокойно и не спеша поразмышлять в одиночестве. В составлении и группировании вопросов участвуют и психологи.

Метод контрольных вопросов широко применяется в процессе обучения как способ развития мышления. В последнее время этот метод служит основой для ведения диалога с компьютером при работе с интеллектуальными, "думающими", программными комплексами - здесь сочетается использование обширной информационной базы и иерархического представления множества вопросов.

Применительно к проектированию варианты метода были предложены А. Осборном (1964 г., США) и Т. Эйлоартом (1969 г.; США).

В качестве примера приведем список контрольных вопросов по Т.Эйлоарту.

1. Перечислите все качества и определения предлагаемого изобретения. Измените их.
2. Ясно сформулируйте задачи, дайте новые формулировки. Выделите главные и второстепенные задачи.
3. Перечислите недостатки имеющихся решений, их основные принципы, дайте новые предложения.

4. Набросайте фантастические, экономические, биологические, молекулярные и другие аналоги.
5. Постройте математическую, механическую, гидравлическую и другие модели.
6. Попробуйте различные виды материалов и энергии, состояния веществ, физические эффекты.
7. Установите варианты, зависимости, возможные связи и логические совпадения.
8. Узнайте мнение ряда неосведомленных в этом деле людей.
9. Устройте сумбурное групповое обсуждение, выслушайте все рассуждения и каждую идею без критики.
10. Попробуйте "национальные" решения: сложное китайское; всеобъемлющее немецкое, всеодолимое русское ("если нельзя, но хочется, то можно") и т. д.
11. Постоянно и везде думайте о проблеме.
12. Побродите среди стимулирующей решение обстановки (выставки, музеи, просмотр журналов и т.п.).
13. Набросайте таблицы цен, величин, типов материалов и т.д. для разных решений проблемы и её частей.
14. Определите идеальное решение.
15. Видоизмените решение с точки зрения времени (ускорить - замедлить), пространства (большое – малое) и т. п.
16. Представьте механизм изнутри.
17. Определите альтернативные проблемы.
18. Чья это проблема? Почему его?
19. Кто придумал первый? История вопроса. Какие были ложные пути.
20. Кто решал ещё эту проблему? Чего он добился?
21. Определите общепринятые граничные условия и причины их установления.

## **Метод мозгового штурма.**

Многие согласятся с тем, что легче выбрать хорошее решение из нескольких вариантов, чем сразу предложить требуемое решение. Естественно, чем больше - вариантов, тем лучшее решение можно найти. Для отыскания большого количества идей в сжатые сроки и предназначен метод мозговой атаки (или, как его ещё называют, мозгового штурма).

Метод основан на коллективном обсуждении, проблемы в психологически комфортной обстановке. Он направлен на преодоление психологической инерции. Отличается простотой и эффективностью.

Коллективное, обсуждение как способ решения задач было известно с древности. Но в виде самостоятельного метода со своими правилами и структурой он был предложен А.Осборном (США) в 1957 году, в развитие своих идей, появившихся в годы 2-й мировой войны.

Решение задачи включает ряд этапов.

### **1. Постановка задачи.**

Заказчик выдаёт руководителю будущей творческой группы задание. Руководитель анализирует проблему и четко формулирует задачу (желаемые свойства, действия, последствия и т.д.).

### **2. Формирование творческой группы.**

Замечено, что по своим способностям решать задачи людей можно разделить на две группы - генераторы идей (люди с большим воображением) и аналитики (люди практического склада мышления, способные трезво осмыслить и конкретизировать идею). Творческую группу формируют из генераторов. Численность группы - 3...10 человек: при большем числе трудно обеспечить свободное высказывание мнений каждому члену, а при меньшем - сложнее развивать предлагаемые идеи и взгляды. Как правило, основу группы составляют неспециалисты в области решаемой задачи. Чем шире и разнообразнее интересы и профессиональная подготовка членов группы, тем продуктивнее будет работа. Уровень образования, специальность не имеют значения, чтобы изначально преодолеть психологическую инерцию,

свойственную специалистам или вызванную должностными обязанностями. Главное требование к кандидату в члены группы - богатство фантазии. Члены группы должны быть знакомы друг с другом и психологически совместимы, во время сеанса находиться в хорошем настроении и соблюдать правила игры.

### 3. Правила поведения во время сеанса мозговой атаки:

а) главное - высказать идею, а не думать о её содержании и аргументации (это - дело аналитиков, количество предпочтительнее качества);

б) мысли должны выражаться кратко и быстро (не более 30 с), поскольку длительное высказывание снижает активность и внимание остальных участников, а возникающие в головах идеи могут забываться;

в) запрещена любая критика идей (осуждающие реплики, усмешки, одергивания и т.п.) и все, что порождает психологические барьеры, т.к. задача каждого - поддержание атмосферы доброжелательности, что высвобождает мысль;

г) желательно развитие идей.

### 4. Проведение сеанса мозговой атаки.

Перед началом сеанса или накануне руководитель излагает членам группы суть задачи (это нужно, когда участники предпочитают настроиться на проблему заранее). Во время сеанса своими вопросами и замечаниями руководитель управляет ходом обсуждения, следит за соблюдением правил и регламента, поддерживает атмосферу доброжелательности и творчества, удерживает от сужения области поиска (заикливания на какой-то одной идее или направлении поиска). Продолжительность сеанса обычно составляет 1-2 часа. Высказываемые идеи должны фиксироваться, но так чтобы участники сеанса не отвлекались (например, записывая разговоры на магнитофон). После сеанса возможно коллективное редактирование высказанных идей с их развитием и дополнением.

Окончательный список идей затем передается группе аналитиков для детальной оценки, при этом перед ними ставится задача не отмечать сходу внешне абсурдные предложения, а пытаться найти способ их реализации, применения или улучшения.

Генерация идей возможна следующими способами аналогии:

- прямой, т.е. по сходству с аналогичным процессом или объектом из живой природы или области, знакомой члену группы (для чего и подбирают людей с широкой областью интересов). Например, требуется найти способ перебраться с одного берега на другой – построим мост;
- фантастической, т.е. использование фантастических, гипотетических, вымышленных и сказочных средств и персонажей. Например, попробовать использовать ковёр-самолет, сдвинуть берега;
- личностной, т.е. отождествление себя с деталями или изделием, попытка изнутри прочувствовать и увидеть, что можно улучшить или изменить, вжиться в образ. Например, сделать огромный шаг, представить себя в виде моста;
- символической, т.е. в парадоксальной форме кратко сформулировать суть проблемы. Например, перейти по твердой воде или воздуху.

Метод мозговой атаки применяется не только для поиска путей решения задачи, но и уточнения ее формулировки, выявления возможных недостатков или побочных эффектов (так называемый метод обратной мозговой атаки). Например, какими недостатками обладает освещение в комнате? – Мигает, создаёт тень и т.п.

Применение метода мозговой атаки не обязательно требует собирать группу людей. Им можно пользоваться и при работе наедине: важно следовать рекомендациям метода, просматривать варианты способов генерации идей, вести обсуждение с самим собой.

Метод мозговой атаки совместно с методом контрольных вопросов лежит в основе "думающих" программ для ЭВМ: компьютер выступает в

качестве собеседника, активизирующего мышление, предоставляющего огромное количество сведений и быстро обрабатывающего информацию.

### **Метод морфологического анализа.**

Метод предназначен для существенного расширения области поиска возможных решений задачи. Он основан на выборе частных решений (морфологических признаков, т.е. признаков, характеризующих устройство) и последующем систематизированном получении их сочетаний (комбинировании). Это - первый метод, специально созданный для решения эвристических задач. Он был разработан Ф.Цвикки (Швейцария) в 1930-х годах, но практическое применение получил с 1942 г., во время его работы в США в авиастроительной фирме. Употребляются также другие названия этого метода: метод морфологического ящика, метод морфологических карт.

Морфологический анализ включает ряд этапов.

1. Выясняется цель задачи.

Осуществляется поиск вариантов функциональных схем, либо принципов действия, либо структурных схем, либо, конструктивных разновидностей разрабатываемой системы.

2. Выделяют узловые точки (оси).

Узлы характеризуют разрабатываемую систему. Это могут быть функция, принцип работы, форма и расположение частей системы и свойства системы (состояние вещества и энергии, вид совершаемого движения и др.), характеристики (физические, химические, биологические, психологические, потребительские и др.). Удобно предварительно (допустим, из анализа аналогичной системы) построить блок-схему функционирования или принципа действия, структурную схему, элементы которых и образуют узлы. Количество узлов обычно выбирается из условия обозримости и реальности анализа, получаемых впоследствии вариантов: при ручной обработке - 4...6 узлов, при работе на ЭВМ - в пределах отведенного на решение задачи времени. Удобно решать задачу поэтапно: сначала по ограниченному числу

наиболее важных узлов, а затем - для дополнительных, второстепенных или выявленных в ходе анализа и представляющих интерес новых узлов.

3. Для каждой узловой точки предлагаются варианты решений.

Их выбирают либо, исходя из личного опыта (зависит от эрудиции), либо беря их из справочников и баз данных. Варианты должны охватывать всю область возможных решений для данной узловой точки, при чём они могут быть не только реальные, но и фантастические. Чтобы задача была обозримой, сначала выделяют укрупненные обобщенные группы вариантов, которые при необходимости впоследствии конкретизируются.

4. Проводят полный перебор всех вариантов решений.

Варианты комбинаций проверяют на соответствие условиям задачи, на несовместимость отдельных вариантов в предлагаемой группе, на реализуемость и иные условия. При необходимости для выбранных решений можно повторить морфологический анализ, конкретизируя оси (узлы) и варианты.

Морфологический анализ удобнее и нагляднее проводить с применением морфологических таблиц. Например, в табл. 1.1 представлены результаты поиска принципов действия транспортного средства.

В качестве узловых точек приняты элементы функциональной схемы: получение энергии – обеспечение перемещения – способ управления, а также структурный признак - расположение источника энергии.

Полное число возможных комбинаций определяется перемножением количества вариантов по каждому узлу. В данном, хотя и простом примере оно равно  $3 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 = 72$ , т.е. достаточно велико (число вариантов преимущественно зависит от числа узлов).

Далее просматриваем возможные комбинации.

Так, набор 1.3–2.1–3.2–4.1 соответствует привычному для нас автомобилю с тепловым двигателем. Для конкретизации этой схемы введём узел - вид теплового двигателя: внутреннего сгорания, паровая машина, газовая турбина, что позволит уточнить исходную схему.

Другой набор 1.2–2.1–3.3–4.2 соответствует трамваю.

Таблица 1.1

Морфологическая таблица транспортного средства

Узлы (оси)	Варианты (классы)
1. Получение энергии (тип двигателя)	1.1. Механический 1.2. Электрический 1.3. Тепловой
2. Обеспечение перемещения (тип движителя)	2.1. Колёса 2.2. Гусеницы 2.3. Воздушный винт 2.4. Шнек
3. Способ управления движителя	3.1. Руль 3.2. Движитель 3.3. Направляющие
4. Источник энергии	4.1. Автономный 4.2. Внешний

Формальное комбинирование вариантов создаёт впечатление автоматизма в применении метода. Однако его эвристическая природа весьма существенна и зависит от следующих субъективных факторов:

- интуитивное выделение узлов и их признаков, состава вариантов. Отсутствие уверенности, что учтены все (и особенно, перспективные) узлы и варианты;
- конкретное решение является следствием анализа просматриваемых комбинаций, возникновения продуктивных ассоциаций и образов.

Метод морфологического анализа служит основой большинства интеллектуальных программ.

## **Теория решения изобретательских задач (ТРИЗ).**

На основе анализа собственного опыта и многочисленных патентов Г.С.Альтшуллер предложил метод под названием АРИЗ - "алгоритм решения изобретательских задач", в котором слово "алгоритм" означало чёткую программу действий. Позднее на его основе был создан более совершенный метод ТРИЗ – теория решения изобретательских задач /1/.

Этот метод предназначен для выявления истинных причин (противоречий), мешающих совершенствованию технической системы, и выбора эффективного средства для их преодоления.

### **1.3. Экспериментальные методы**

Эксперименты, в основном, проводятся со следующими целями.

1) Определение закономерностей и характеристик, присущих исследуемому объекту (например, зависимость удлинения детали при её нагреве), и определение действительных значений его параметров (например, физико-механические свойства используемого материала, степень устойчивости против коррозии и т. п.). Эта деятельность связана с исследованиями, поиском нового и неизвестного.

2) Сбор данных, содержащих достаточные сведения для подтверждения правильности гипотез или ранее принятых технических решений (определение фактических технических характеристик, их соответствие заданным показателям качества, проверка технологических решений и т. д.). Такие работы связаны с проведением испытаний, т.е. практической проверкой теорий и предположений.

3) Поиск новых проектно-конструкторских решений посредством натурного моделирования и экспериментирования. В силу дороговизны и трудоёмкости такие работы ведутся очень редко, но в некоторых ситуациях это может быть единственным приемлемым способом решения задачи.

Экспериментальные данные получают посредством измерений, анализов, диагностированием, фиксацией событий (отказы, повреждения) и другими способами. Исследуемые характеристики изделий либо экспериментально оцениваются (задача - получение качественных или количественных оценок), либо контролируются (задача - установление соответствия реальных характеристик требуемым характеристикам).

Испытания проводятся в естественных или искусственно созданных (моделируемых) условиях, или же в условиях, обусловленных функционированием самого изделия (например, внутренний нагрев вследствие трения). Для имитации условий используют следующие виды воздействия: механические, климатические, термические, электрические, химические и др.

В зависимости от целей возможно проведение следующих видов испытаний:

- *определяющие* - уточняют значения характеристик изделия;
- *контрольные* - уточняют качество изделия;
- *сравнительные* - проводят для сравнения в идентичных условиях характеристики аналогичных или одинаковых объектов;
- *исследовательские* - изучают и уточняют свойства изделия.

В зависимости от степени соответствия реальным условиям испытания подразделяются на следующие виды:

- *лабораторные* – изучается работа отдельных узлов и деталей, макетов и образцов в лабораторных условиях;
- *стендовые (заводские)* – проводятся на испытательном оборудовании, проверяется взаимодействие механизмов и отдельных узлов, выявляются дефекты, замеряются основные характеристики;
- *полигонные* – опробование изделия в рабочих условиях и предусматривает различные варианты условий и режимов работы с целью уточнения фактических характеристик;

- *натурные* – испытывается реальное изделие в условиях его прямого назначения с непосредственной оценкой реальных свойств;

- *эксплуатационные* – проводятся в условиях эксплуатации серийно (промышленно) выпускаемого изделия, собираются статистические данные, выявляются скрытые дефекты и дополнительные возможности.

## **1.4. Формализованные методы**

Формализованные методы - наиболее исследованная область человеческой деятельности. Они являются основой создаваемых систем автоматизированного проектирования (САПР).

Применение формализованных методов подразумевает использование расчётных зависимостей и компьютерных программ. Это могут быть специальные или типовые зависимости и программы, нормативные (предписанные стандартами) методы расчётов. Они предназначены для получения численных результатов, характеризующих проектное решение.

Область применения формализованных методов постоянно расширяется. Это объясняется тем, что они позволяют:

- построить прогноз поведения технической системы или процесса во времени и в пространстве;
- сравнительно быстро и дешево найти (рассчитать) несколько вариантов решений, что служит основой для выбора лучшего и, следовательно, конкурентоспособного изделия;
- определять параметры на ранних этапах проектных работ, когда вид создаваемых объектов или их макетов еще точно не известен;
- поставить "чистый" эксперимент, т.е. исследовать зависимость свойств и характеристик от одних параметров при отсутствии влияния (постоянстве) других параметров;
- автоматизировать проектирование.

Наличие в проектной деятельности формализованных процедур и широкое распространение компьютеров позволили разрешить противоречие между возрастающей сложностью технических систем и требованием к сокращению времени проектирования, за счёт разработки САПР, которые состоят из комплекса технических средств (компьютер, плоттер, принтер) и программного обеспечения, включающего программы графического моделирования, прикладные расчётные программы, базы данных.

## **1.5. Методы конструирования**

В отличие от эвристических методов методами конструирования новое решение получают, как правило, усовершенствованием уже существующих конструкций машин и оборудования. На практике эвристические методы позволяют найти оригинальное техническое решение примерно в 10% решаемых задач. Новое решение обычно получают путём внесения изменений в уже существующую конструкцию, применяя методы конструирования, к которым относятся конструктивная преемственность, унификация, агрегатирование, модифицирование, стандартизация, инверсия и другие.

***Конструктивная преемственность*** – это продолжение использования в новом изделии элементов ещё выпускающегося или уже выпускавшегося изделия с сохранением прежней технологии их производства. Преемственность значительно сокращает сроки и затраты на конструирование, на технологическую подготовку производства и проведение испытаний новой конструкции, повышает её надёжность (благодаря применению уже проверенных в эксплуатации частей). Она особенно эффективна при выпуске продукции, требующей специальной технологической подготовки, т.е. изготовления нового специального инструмента и приспособлений, наладки оборудования. Преемственность

позволяет постепенно, без больших затрат перейти на выпуск новой сложной продукции.

Разновидностью преемственности является использование в разрабатываемом изделии готовых покупных элементов. Это существенно снижает требования к необходимым для его выпуска ресурсам, но усиливает зависимость от производителя этих элементов. Целесообразность применения готовых элементов подтверждается сравнением затрат на покупку нужных элементов с затратами на организацию их производства собственными силами.

Конструктивная преемственность предполагает использование при проектировании предшествующего опыта машиностроения данного профиля и смежных отраслей, введение в проектируемые конструкции машин и оборудования всего полезного, что есть в настоящее время. Почти каждая современная машина представляет итог работы конструкторов нескольких поколений. Начальную модель машины постепенно совершенствуют, снабжают новыми деталями, узлами и агрегатами, обогащают новыми конструктивными решениями, являющимися плодом творческих усилий и изобретательности конструктора.

Конструктивная преемственность предусматривает постепенное совершенствование конструкции путём введения в неё отдельных новых или дополнительных деталей, узлов агрегатов взамен морально устаревших и не удовлетворяющим современным требованиям или с целью изменения прежних характеристик изделия.

Метод широко использует основные эвристические методы. Так, для поиска слабых мест в конструкции эффективно применять метод иерархической декомпозиции, расчлняя изделие на как можно более простые или элементарные части и отыскивая те, с которыми связана неудовлетворительная работа всего изделия. Чем элементарнее будет заменяемая часть, тем проще и быстрее будет создана более совершенная конструкция: меньше времени уйдет на разработку, не понадобится

существенно переналаживать технологический процесс. При этом необходимо выполнять проверку на состыковку новой части с остальными частями изделия (по геометрическим размерам и формам сопрягаемых поверхностей, усилиям взаимодействия и передаваемой мощности и других входных и выходных параметров). Необходимо обращать внимание на то, чтобы согласование размеров, создание специальных условий и т.д. не усложняло технологию изготовления и сборки соседних взаимодействующих частей. «Конструктор должен смотреть вперёд, оглядываться назад и озираться по сторонам» /3/.

Метод конструктивной преемственности не означает ограничения творческой инициативы. Проектирование, усовершенствование и оптимизация машин и оборудования представляет огромное поле деятельности для конструктора.

**Унификация** состоит в многократном применении в конструкции одних и тех же элементов, что способствует сокращению номенклатуры деталей и уменьшению стоимости изготовления, упрощению технического обслуживания и ремонта машин.

Унификация конструктивных элементов позволяет сократить номенклатуру обрабатывающего, мерительного и монтажного инструмента. Унификации в первую очередь подлежат посадочные соединения (по номинальным размерам, типу посадок и качеству), резьбы (по диаметру, шагу и качеству), шлицевые и шпоночные соединения, крепёжные детали и т. д. Целесообразно сокращать номенклатуру материалов, виды отделочных операций, гальванических покрытий, типы сварки, форму сварных швов и др.

Унификация оригинальных деталей узлов может быть внутренней (в пределах данного изделия) и внешней (заимствование деталей с других машин данного или смежного производства). Большую экономию даёт заимствование деталей машин, изготавливаемых в серийном или массовом производстве.

Унификация марок и сортамента материалов, типоразмеров крепёжных деталей, подшипников, муфт и других стандартных деталей и узлов облегчает снабжение завода-изготовителя и ремонтных предприятий материалами, стандартными покупными изделиями.

Конструктивные элементы, выявляющиеся в процессе компоновки, следует многократно использовать для всей конструкции, осредняя расчётные параметры и добиваясь максимального сокращения их номенклатуры.

В качестве примера унификации размеров под ключ, приведем узел регулирования редукционного клапана (рис. 1.1). В первой конструкции (рис. 1.1, а) применены три размера резьбовых соединений (поз. 1 - 3), в унифицированной конструкции (рис. 1.1, б) - один размер (поз. 4).

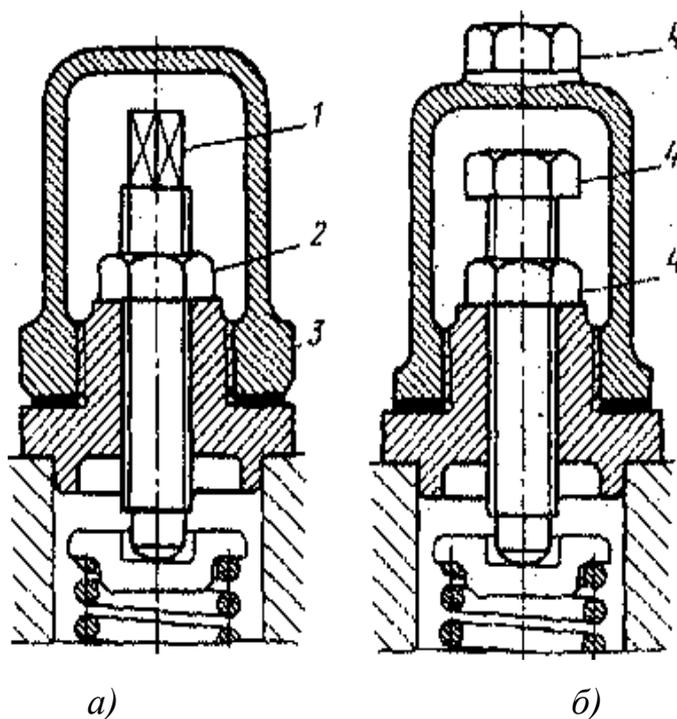


Рис. 1.1. Унификация размеров под ключ

Следует добиваться максимальной унификации оригинальных деталей. Особенно это важно для трудоёмких и многократно повторяющихся деталей.

Конвейерная цепь, представленная на рис. 1.2, а, состоит из звеньев двух типов 1 и 2. В рациональной конструкции (рис. 1.2, б) звенья 3 унифицированы.

Стяжной хомут (рис. 1.3, *a*) состоит из двух различных деталей 1 и 2. Введение промежуточной серьги 4 (рис. 1.3, *б*) позволяет сделать половины хомута 3 одинаковыми.

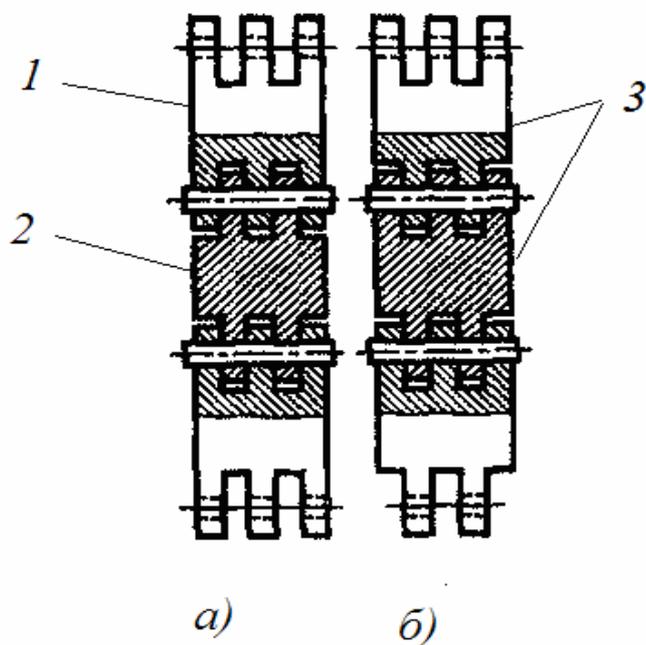


Рис. 1.2. Унификация деталей конвейерной цепи

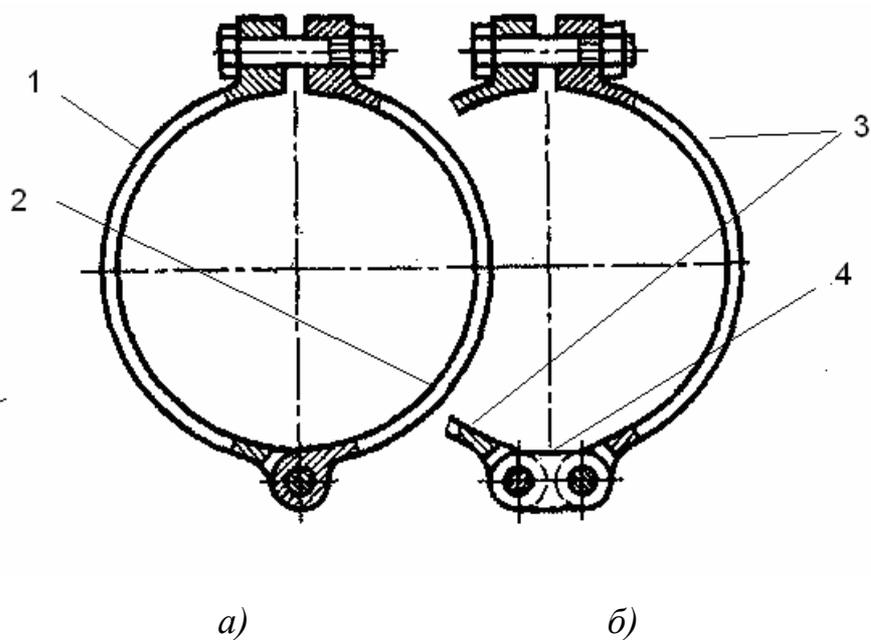


Рис. 1.3. Унификация деталей хомута

**Модифицированием** называют переделку конструкции машин с целью приспособления их к иным условиям работы, операциям и видам выпускаемой продукции без изменения основной конструкции. Иногда в понятие модифицирования вкладывают смысл модернизации машины с целью улучшения её показателей.

Модифицирование машины для работы в различных климатических условиях сводится преимущественно к замене материалов. Например, в машинах, работающих в условиях жаркого и влажного климата (машины тропического исполнения) применяют коррозионно-стойкие материалы; в машинах, эксплуатируемых в областях с суровым климатом (машины арктического исполнения) - хладостойкие материалы и системы смазки.

Модифицирование транспортных машин (автомобильный и авиационный транспорт) заключается во всемерном облегчении машины путём замены тяжёлых сплавов (чугун, сталь) лёгкими (алюминиевые и титановые сплавы).

**Агрегатирование** заключается в создании машин путём сочетания унифицированных агрегатов, представляющих собой автономные узлы (сборочные единицы), устанавливаемые в различных сочетаниях и комбинациях на общем основании.

Для удобства сочленения комбинированные агрегаты обладают полной взаимозаменяемостью по присоединительным размерам.

Основные преимущества агрегатирования: сокращение сроков и стоимости проектирования и изготовления машин, упрощение обслуживания и ремонта, возможность переналадки для выполнения разнообразных технологических операций.

Частичным агрегатированием является использование стандартизированных узлов и агрегатов из числа серийно выпускаемых промышленностью (редукторы, насосы, компрессоры, коробки скоростей, механизмы переключения муфт и т.д.).

Целесообразно конструировать узлы в виде независимых агрегатов, отдельно собираемых, регулируемых, подвергаемых обкатке, контрольным испытаниям и устанавливаемых в отработанном виде на машину. Последовательно проведенное агрегатирование позволяет осуществить параллельную и независимую сборку узлов машины, упрощает монтаж, ускоряет доводку опытных образцов, облегчает использование на новых машинах отработанных и проверенных в эксплуатации конструкций и упрощает ремонт, позволяя комплектно заменить износившиеся узлы новыми. Агрегатирование, иногда усложняет конструкцию, но в конечном счете всегда даёт большой выигрыш в общей стоимости изготовления машин, надёжности и удобстве эксплуатации.

Пример агрегатирования небольшого узла приведён на рис.1.4. В конструкции, показанной на рис.1.4 *а*, редукционный клапан установлен непосредственно в корпусе. Установка клапана в отдельной втулке делает узел агрегатным (рис. 1.4, *б*).

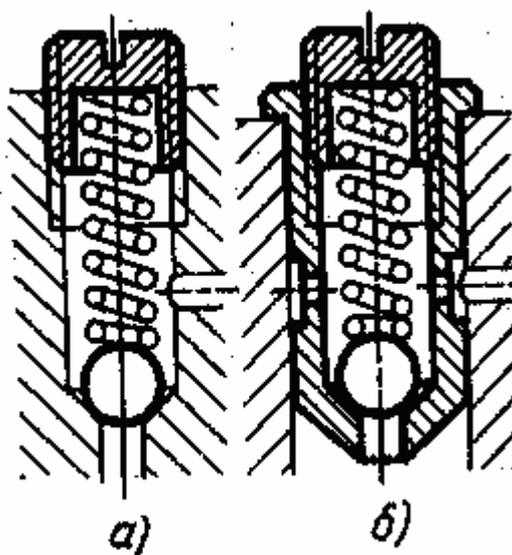


Рис. 1.4. Агрегатирование редукционного клапана

Конструкция узла установки распределительного золотника в станине, показанная на рис. 1.5, *а*, неудовлетворительна, так как точное отверстие под золотник выполнено непосредственно в отливке станины. На участке

расположения золотника, в месте скопления материала могут возникнуть раковины и пористость, делающие уплотнение золотника невозможным.

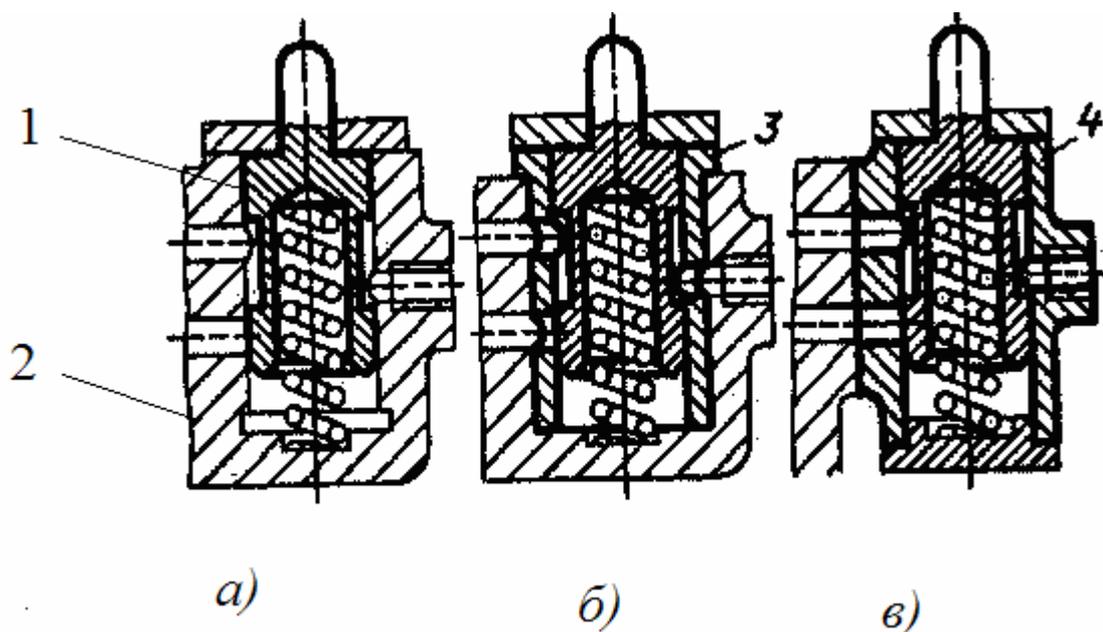


Рис. 1.5. Агрегатирование золотникового распределителя

В улучшенной конструкции (рис. 1.5, б) золотник, установлен в промежуточной втулке 3, выполненной из качественного материала с повышенной износостойкостью. В наиболее правильной конструкции (рис. 1.5, в) золотник установлен в отдельном корпусе 4, соединяемом со станиной по посадочной поверхности.

**Стандартизация** обеспечивает создание конструкции, а также её последующее совершенствование на основе применения стандартных деталей, узлов и агрегатов, а также элементов со стандартными параметрами. Это позволяет, несмотря на сложность стандартных элементов, использовать уже разработанную техническую документацию, покупные изделия (электродвигатели, подшипники качения и др.) применять типовые технологические операции, упрощает эксплуатацию и ремонт.

Стандартизация ускоряет проектирование, облегчает изготовление и при целесообразной конструкции стандартных элементов способствует повышению надёжности машин.

Однако применение стандартов не должно стеснять творческую инициативу конструктора и препятствовать поискам новых, более рациональных конструктивных решений. При конструировании машин не следует останавливаться перед применением новых решений в областях, охватываемых стандартами, если эти решения имеют явное преимущество.

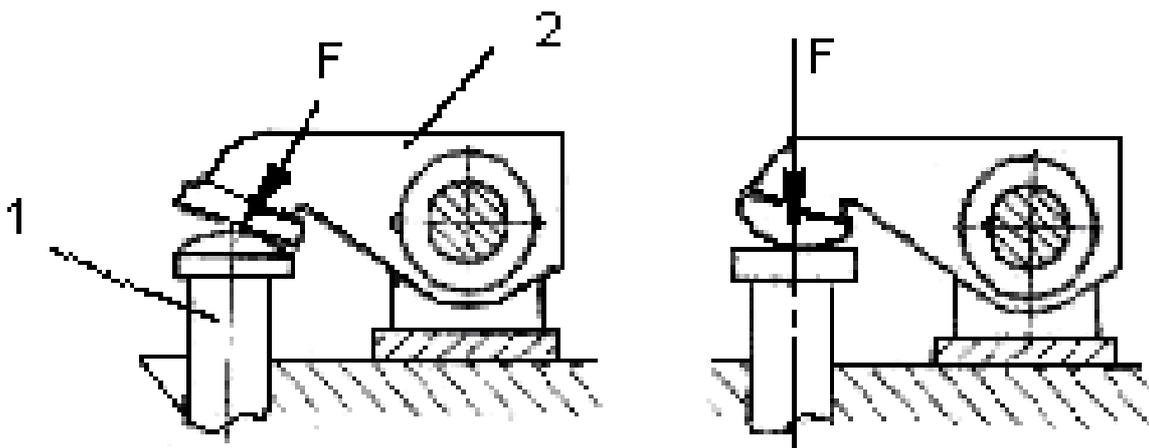
**Метод инверсии** – решение задачи конструирования путём изменения функций, форм и положения деталей конструкции.

В ряде случаев бывает полезным поменять детали ролями, например, ведущую деталь сделать ведомой, неподвижную – подвижной, направляющую – направляемой, охватывающую – охватываемой, пружину растяжения – пружиной сжатия. Иногда целесообразно инвертировать формы деталей, например, наружный конус заменить внутренним конусом, выпуклую сферическую поверхность – вогнутой. В некоторых случаях оказывается выгодным переместить конструктивные элементы с одной детали на другую, например, шпонку с вала на ступицу. Всякий раз конструкция при этом приобретает новые свойства.

Дело конструктора – взвесить преимущества и недостатки исходного и инвертированного вариантов с учетом надёжности, технологичности, удобства эксплуатации и выбрать наилучший из них. У конструктора метод инвертирования является неотъемлемым инструментом мышления и значительно облегчает процесс поиска решений, в результате которых рождается рациональная конструкция.

Примеры инвертирования типовых машиностроительных узлов приведены на рисунках 1.6–1.7.

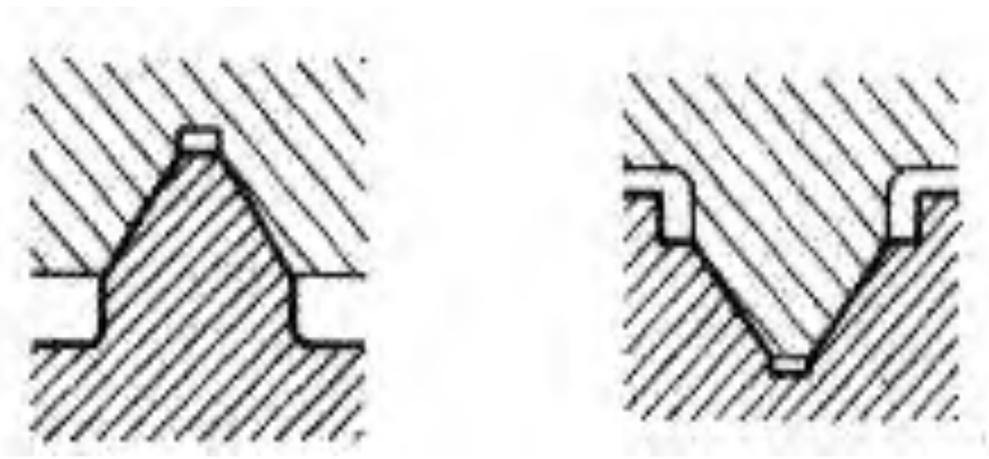
На рис. 1.6, *а* головка толкателя 1 выполнена сферической, а боёк коромысла 2 плоским; на рис. 1.6, *б* – наоборот. Инверсия позволяет устранить поперечную нагрузку на толкатель от контактного усилия  $F$ . Кроме того, боёк коромысла можно сделать цилиндрическим, что обеспечит линейный контакт. На рис. 1.7, *б* конструкции направляющей выгодно отличается от направляющей на рис. 1.7, *а* по условиям смазывания.



а)

б)

Рис. 1.6. Привод толкателя



а)

б)

Рис. 1.7. Направляющая

## 2. МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

### 2.1. Принципы проектирования оборудования

Одним из основных принципов проектирования оборудования является принцип системного подхода, применение которого связано с другими методологическими принципами: принципом максимальной эффективности, принципом типовых решений, принципом обеспечения развития создаваемого объекта и др.

Под *системным подходом (анализом)* понимают совокупность методологических средств, используемых для подготовки и обоснования решений по сложным проблемам научно-технического характера. Роль системного подхода особенно возрастает при анализе и проектировании сложного оборудования, так как процесс конструирования является многоэтапным и обычно проходит на основе предварительного изучения всего объёма исходных данных. *Система* — это множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которое образует определенное единство. Важнейшими системными принципами являются целостность, структурность, взаимозависимость системы и среды, иерархичность, множественность.

Под *целостностью* понимают принципиальную несводимость свойств системы к сумме свойств составляющих её элементов и невыводимость из свойств целого, а также зависимость каждого элемента, свойства и отношения системы от его места и функций внутри целого. Любое оборудование не может рассматриваться как простая сумма входящих в неё агрегатов, так как благодаря непрерывности и возможности оперативного управления процессом проектирования она позволяет производить изделия принципиально нового качества.

*Принцип структурности* говорит о возможности описания системы через установление её структуры (т. е. сети связей и отношений системы) и

об обусловленности поведения системы в целом, поведением её отдельных элементов и свойствами её структуры.

**Взаимозависимость системы и среды** означает, что система формирует и проявляет свои свойства в процессе взаимодействия со средой, и поэтому любая система имеет входы и выходы. Например, входами являются климатические условия (температура, влажность), размеры территории на которой будет располагаться создаваемое оборудование, требуемая производительность т.д.

**Множественность описания** любой системы обусловлена тем, что в силу принципиальной сложности системы её адекватное познание требует построения множества различных моделей, каждая из которых описывает только определенный аспект системы. Так, можно рассматривать модели прокатного стана, связанные с точностью геометрических размеров, качеством поверхности, производительностью и т. д.

Привлечение системного подхода к анализу и проектированию оборудования является необходимым потому, что процесс принятия решений осуществляется в условиях неопределённости, которая обусловлена наличием факторов, не имеющих строгой количественной оценки. К характерной особенности системного подхода относится то, что он не является конкретным методом проектирования. Его методическая специфика состоит в том, что он нацеливает разработчика на раскрытие целостности изучаемого объекта, выявление многообразных связей объекта и построение единой теоретической картины. Методы системного анализа направлены на выдвижение альтернативных вариантов поставленной задачи, определения степени неопределённости по каждому из вариантов и сопоставление вариантов по различным критериям эффективности. В то же время окончательное принятие решения остается в компетенции соответствующего должностного лица.

Основными особенностями системного анализа являются:

- процесс принятия решения должен начинаться с выявления и чёткого формирования конечных целей;
- всю проблему необходимо рассматривать как единое целое и выявлять все последствия и взаимосвязи каждого частного решения;
- на каждом этапе следует выявлять и анализировать возможные альтернативные пути достижения цели;
- цели отдельных элементов системы не должны противоречить конечным целям решаемой проблемы.

Одной из главных задач системного анализа является построение обобщённой модели, отображающей реальную систему и позволяющей прогнозировать её функциональные характеристики. При этом для описания модели конструкции могут использоваться разнообразные математические методы. Так, если удастся достаточно четко сформулировать единственную цель, степень достижения которой можно определить с помощью одного критерия, то применяют методы математического программирования. Когда степень достижения единственной цели оценивается на основе нескольких критериев, используют аппарат теории полезности и т. д.

Разработка и проектирование оборудования должны базироваться на системном анализе технологических процессов, в результате которого разработчик получает ответ на три основных вопроса:

- оценка целесообразности создания оборудования;
- чёткая формулировка целей создаваемого оборудования;
- сбор, подготовка и упорядочивание исходных данных для проектирования.

При оценке целесообразности создания оборудования необходимо учитывать две группы критериев:

- важность создания, определяемая расширением выходных параметров;

- полезность, учитывающая в основном технико-экономические показатели и условия работы на нём.

В основе принципа максимальной эффективности системы лежит соотношение (или разность) между показателями ценности результатов (полезным эффектом), получаемых в процессе функционирования системы, и показателями затрат на её создание. Оборудование должно быть технически совершенным и выполнять возложенные на него функции при минимальных затратах на создание и эксплуатацию. Отсюда вытекают требования максимальной производительности, заданного качества готовой продукции, психологического комфорта оператора (достигается за счёт правильного выбора соответствующих средств отображения информации и обеспечения работы оборудования в автоматическом режиме).

***Принцип принятия типовых решений*** при проектировании и создании оборудования, должен выполняться как в отношении технических средств, так и всех видов обеспечения системы (математического, информационного, организационного и др.). В соответствии с этим принципом реализация проекта должна быть основана на широком использовании комплекса типовых унифицированных технических средств, применение которых не только значительно сокращает трудоёмкость создания оборудования, но и упрощает вопросы его наладки, эксплуатации и ремонта. Одним из прогрессивных способов является агрегатно-модульное построение оборудования. Использование принципа принятия типовых решений позволяет сосредоточить основное внимание на решении тех проблем, которые характерны только для данного вида оборудования, и тем самым значительно сократить затраты на проектирование и внедрение в целом.

Обеспечение возможности развития системы позволяет осуществить перестройку её структуры и организации после ввода в эксплуатацию, что необходимо в связи с изменением числа и сложности решаемых задач,

повышением требований к точности геометрических размеров, увеличением производительности и т. д.

Для определения оптимальных конструктивно-компоновочных и технологических решений можно рекомендовать придерживаться следующих основных принципов:

**1) принцип наибольшей эксплуатационной производительности,** для обеспечения которого целесообразно закладывать в конструкцию предпосылки интенсификации использования машины за счёт её универсальности;

**2) принцип наименьшей стоимости производства и эксплуатации,** для реализации которого следует обеспечивать максимальную технологичность составных частей машины и последовательно выдерживать агрегатно-модульный принцип, конструировать сборочные единицы машины в виде независимых агрегатов, устанавливаемых на машинах в собранном виде;

**3) принцип наименьшей материалоемкости и энергоёмкости,** для чего целесообразно применять современные методы расчёта машин и агрегатов на прочность и износостойкость, чтобы исключить завышенные результаты, которые могут привести к перерасходу конструкционных материалов;

**4) принцип наибольшей надёжности,** для обеспечения которого при проектировании новых конструкций и машин для новых технологических процессов следует проверять все новые элементы с помощью эксперимента, физического или математического моделирования, а также выполнять ответственные детали из качественных материалов, предусматривать для их изготовления технологические процессы, обеспечивающие повышение безотказности и срока службы;

**5) принцип оптимальной унификации и стандартизации,** для чего необходимо вести проектирование машины на основе наиболее

прогрессивного способа – агрегатирования с применением современных баз данных.

Как правило, при проектировании приведенные принципы используются не изолированно, а в совокупности. Так, наибольшая эксплуатационная производительность машины во многом зависит от её надёжности. Ненадёжная, часто выходящая из строя, требующая больших затрат и средств на обслуживание и ремонт машина не может обеспечить высокую производительность. Машина с малым числом стандартных или заимствованных составных частей не обеспечит высокой надёжности, вызовет неоправданно высокие затраты на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации. Следует отметить, что отнесение перечисленных правил к одному из пяти основных принципов конструирования носит в достаточной мере условный характер.

При разработке конструкции приходится решать задачу по установлению оптимальных значений таких противоречивых свойств, как надёжность, экономичность, гибкость, удобство эксплуатации и т. п. Надёжность функционирования машины является одним из основных показателей её эффективности и непосредственно связана с экономическими характеристиками. С одной стороны, для повышения эффективности функционирования необходимо максимально увеличить её надёжность путём изменения структуры, разработки специального информационного обеспечения или введения дополнительных технических средств. Однако это приводит к резкому увеличению начальных затрат и продолжительности периода разработки, что может оказаться экономически неоправданным. С другой стороны, чрезмерное уменьшение надёжности вызывает снижение эффективности её функционирования, как за счёт уменьшения её производительности, так и за счёт увеличения эксплуатационных расходов на проведение работ по устранению неисправностей. Время разработки машины также оказывает влияние на её эффективность: чем больше длительность периода проектирования и создания, тем больше вероятность того, что она не

будет отвечать современному научно-техническому уровню, тем медленнее будут окупаться затраченные средства. Однако значительное сокращение сроков разработки линии в целом или её отдельных узлов может привести к снижению качества проектных решений и тем самым к ухудшению эффективности функционирования.

На основе изложенного, а также в результате обобщения опыта разработки и создания оборудования ведущими проектно-конструкторскими организациями России можно сформулировать следующие положения, применение которых обеспечивает получение оптимальных конструкторско-компоновочных решений: максимальная эксплуатационная производительность; минимальная стоимость производства и эксплуатации; минимальная материалоемкость и энергоёмкость; максимальная надёжность; оптимальная унификация и стандартизация.

Подводя итог, можно кратко сформулировать общие требования к проектируемому оборудованию следующим образом: обеспечение функционирования с минимально возможным числом отказов и неисправностей, с заданной производительностью выпуска продукции требуемого качества.

## **2.2. Этапы проектирования оборудования**

Под проектированием оборудования понимают процесс принятия и оценки взаимосвязанной совокупности решений, который направлен на создание конструкции и определение эффективных путей достижения конечного результата. Цель проектирования состоит в разработке проекта, который удовлетворяет всем требованиям технического задания.

При проектировании оборудования необходимо учитывать общие принципы построения и предъявляемые требования (см. разд. 3.1). Процесс проектирования представляет собой совокупность взаимосвязанных решений, каждое из которых зависит не только от решений, принятых на

предыдущих этапах, но и от возможного их влияния на последующие этапы проектирования. Кроме того, на каждом этапе проектирования возникает большое число возможных решений, в результате чего практически невозможно проанализировать всю совокупность возникающих вариантов. Следовательно, процесс проектирования нельзя представить в виде последовательности независимых друг от друга этапов, и поэтому методика проектирования должна предусматривать возможность систематического и оперативного корректирования или пересмотра принимаемых решений.

Основные этапы проектирования и последовательность их выполнения приведены на рис. 2.1. Представленный алгоритм проектирования согласуется с рекомендациями ГОСТ 13.101-13.109-68, в которых отражены основные положения ЕСКД, и основан на использовании выше изложенных системных принципов проектирования, полученных на основании обобщения отечественного и зарубежного опыта проектирования и создания оборудования. Ниже рассмотрено содержание этапов.

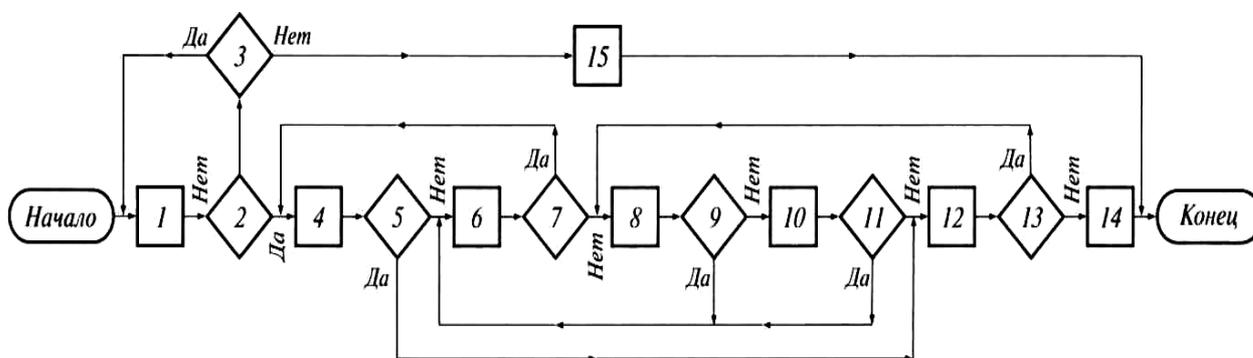


Рис. 2.1. Основные этапы проектирования и последовательность их выполнения (обозначения описаны в тексте)

### ***Этап 1. Получение технического задания на проектирование.***

В техническом задании на проектирование обычно указывают основное назначение, технические характеристики, показатели качества, технико-экономические требования, стадии проектирования, планируемый

уровень затрат, сроки выполнения, а также специальные требования и особые условия проектирования. Главной целью данного этапа является сбор и подготовка информации для оценки возможности и целесообразности создания конструкции. Для этого необходимо конкретизировать цель и задачи, определить возможность изменения постановки задачи с учётом перспектив развития производства, выполнить анализ способов изготовления, состава и характеристик используемого оборудования, уточнить метрологические и информационные характеристики, систематизировать данные для проведения экспертных оценок по цели, задачам и технико-экономическому эффекту от применения создаваемой конструкции и др.

***Этап 2. Оценка возможности и целесообразности создания конструкции.***

На основе анализа технической, научной и патентной литературы установлено, что разработка конструкции преследует две основные цели: увеличение производительности труда и выхода годного, а также повышение качества. В связи с переходом на рыночные отношения и необходимостью конкурировать с зарубежными поставщиками оборудования целью создания нового оборудования обычно является повышение качества при широком использовании энергосберегающих, материалосберегающих и экологически безопасных технологий и оборудования. Если возможность и (или) целесообразность создания изделия вызывает сомнение, то необходимо перейти к этапу 3.

В случае положительного ответа на поставленный вопрос происходит переход к этапу 4.

***Этап 3. Оценка возможности изменения технического задания.***

Если при выполнении этапа 2 выявились принципиальные трудности создания конструкции, то в связи с этим, необходимо провести согласование с заказчиком возможности изменения исходных данных на проектирование. Если техническое задание изменить нельзя, то дальнейшие работы прекращаются, и делается вывод о невозможности или нецелесообразности

проектирования (этап 15). При положительном решении происходит возврат к этапам 1—2—4.

#### ***Этап 4. Уточнение цели и задач проектирования.***

Основное назначение данного этапа — подготовка данных для оценки возможности отнесения разработанного или выбранного проекта к типовому (см. этап 5). При его выполнении используются как результаты первого этапа, так и дополнительные сведения, полученные на основе более детального изучения производства, определённого в техническом задании. На данном этапе уточняется перечень задач, определяются исходные данные для создания предварительной (априорной) модели конструкции. Можно рекомендовать следующий порядок его проведения: сбор информации о создаваемой конструкции, для чего можно использовать специальные анкеты, содержащие систематизированный перечень вопросов; анализ полученной информации, включая отсев дублирующей и несущественной информации, разделение взаимозависимой информации, её группировка по некоторым признакам и др.; формулировка цели и задач проектирования, при этом необходимо дать критерии оценки качества решения задач, указать область допустимых или желательных решений и установить факторы, влияющие на решение поставленных задач; устранение противоречий (если они имеются) между задачами; построение априорной модели, которая представляет собой совокупность зависимостей (графических, аналитических, логических и др.) между характеристиками конструкции и ограничений на них. В процессе проектирования и проведения исследований отдельных агрегатов и конструкции в целом степень неопределённости знаний об изучаемом процессе снижается и модель уточняется.

#### ***Этап 5. Оценка возможности отнесения конструкции к типовой.***

На данном этапе рассматривается вопрос о возможности отнесения конструкции к одному из известных классов. Если конструкцию можно отнести к типовой, то проектирование значительно упрощается, так как становится возможным использовать типовые решения. На рис. 2.1 этому

случаю соответствует переход от этапа 5 непосредственно к этапу 12, на котором осуществляется разработка технического проекта конструкции. При отрицательном ответе необходимо перейти к этапу 6.

#### ***Этап 6. Разработка технического предложения.***

Техническое предложение включает совокупность конструкторских документов, которые должны содержать технические и технико-экономические обоснования целесообразности разработки документации на основании анализа технического задания и различных вариантов возможных решений с учётом конструктивных и эксплуатационных особенностей разрабатываемого и существующего оборудования. Основными работами на данном этапе являются: анализ полученных на предыдущих этапах результатов; разработка функциональной структуры конструкции, обеспечивающая решение поставленных задач; выбор технологической схемы и возможного состава оборудования; составление перечня требований и установление технических характеристик отдельных агрегатов и конструкции в целом; обоснование выбора показателей эффективности; уточнение сроков разработки оборудования и ввода его в эксплуатацию; оформление технического предложения.

#### ***Этап 7. Оценка необходимости уточнения технического задания.***

В процессе разработки технического предложения может возникнуть необходимость уточнения некоторых исходных данных. При необходимости уточнения технического задания следует вернуться к этапу 4, в противном случае происходит переход к следующему этапу.

#### ***Этап 8. Выбор базовой технической структуры.***

Цель данного этапа проектирования состоит в выборе одного из возможных вариантов структуры конструкции, характеристики которой наиболее полно удовлетворяют установленному критерию оптимальности, при этом уточняются значения и диапазоны изменения внешних и внутренних параметров элементов конструкции.

### ***Этап 9. Оценка необходимости уточнения технического предложения.***

В процессе выполнения предыдущего этапа может появиться необходимость уточнения некоторых положений технического предложения, при этом следует вернуться к этапу 6, в противном случае происходит переход к следующему этапу.

### ***Этап 10. Разработка эскизного проекта конструкции.***

Эскизный проект должен содержать принципиальные конструктивные решения, дающие общие представления об устройстве и принципе работы агрегата и его отдельных элементов, а также сведения, определяющие назначение, основные параметры и габаритные размеры. На данном этапе осуществляется анализ и синтез элементов технологической линии агрегата, при этом уточняется его целевая функция, определяется перечень внутренних параметров с соответствующими ограничениями, устанавливается функциональная связь между внутренними и внешними параметрами элементов, уточняются показатели эффективности, конкретизируется техническое задание, решаются задачи выбора и оптимизации отдельных подсистем и элементов. В соответствии с разд. 1.4 при разработке конструкции целесообразно использовать агрегатно-модульный принцип и применять однотипные технические средства.

### ***Этап 11. Оценка необходимости корректировки параметров линии.***

При необходимости уточнения технического предложения следует вернуться к этапу 6, в противном случае происходит переход к этапу 12.

### ***Этап 12. Разработка технического проекта конструкции.***

В техническом проекте содержится совокупность конструкторских документов, которые должны отражать окончательные технические решения, дающие полное представление о разрабатываемом устройстве, а также исходные данные для разработки рабочей документации.

### ***Этап 13. Оценка необходимости уточнения технического проекта.***

При необходимости уточнения технического проекта следует вернуться к разработке эскизного проекта (этап 8), в противном случае

происходит переход к следующему этапу.

#### ***Этап 14. Разработка рабочей документации.***

Данный этап завершает процесс проектирования. Его целью является разработка конструкторских документов, предназначенных для изготовления, монтажа, наладки, испытания и эксплуатации отдельных агрегатов и технологической линии в целом.

***Этап 15. Невозможность или нецелесообразность создания конструкции.***

### **2.3. Конструкторская документация**

Проектирование и оптимизация конструкций машин и оборудования связаны с документированием результатов такой работы как проведение научных исследований, проектирование, изготовление. Документация необходима для грамотной эксплуатации изделия, правильного хранения и утилизации, воспроизведения результатов.

Практическим результатом проектирования является комплект проектной документации.

Вся документация подразделяется на конструкторскую и научную. Порядок оформления документации предписывается стандартами или нормативными документами предприятий. Такая регламентация упрощает взаимопонимание между участниками процесса проектирования благодаря использованию единых форм представления документов и информации.

Конструкторская документация связана с разработкой конструкции изделия и содержит сведения по составу и устройству изделия, необходимые для его изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта. Документация подразделяется на текстовую и графическую. Внешним признаком конструкторской документации является наличие рамки и основной надписи, которая оформляется по ГОСТ 2.104.

### **Текстовая конструкторская документация.**

Документация оформляется на листах формата А4. Её состав регламентируется ГОСТ 2.106, который устанавливает форму и правила конструкторских документов. Приведём описание основных документов.

*Спецификация.* Она является обязательным документом на составное изделие (сборочную единицу, комплекс, комплект), полностью и однозначно определяет состав изделия и относящихся к нему конструкторских документов. Сведения в спецификации (рис. 2.2.) группируют по разделам, которые располагают в следующем порядке (ГОСТ 2.108):

- документация - проектная (в том числе - чертежи и пояснительная записка), рабочая, эксплуатационная, ремонтная;
- комплексы (приводится их перечень);
- сборочные единицы (приводится их перечень);
- детали (приводится их перечень в порядке, определяемом ростом индекса обозначения, который назначается по ГОСТ 2.201 или в соответствии с внутренними правилами организации - разработчика);
- стандартные изделия, которые группируют по видам стандартов (государственные, отраслевые, предприятий);
- прочие изделия - изделия, потребность в которых может возникнуть в процессе изготовления или комплектации или которые по своему назначению и условиям применения не попадают в остальные разделы спецификации;
- материалы – указываются такие расходуемые материалы, количество, размеры и форма которых определяются в момент сборки или комплектации изделия. Их приводят в следующей последовательности: металлы, пластмассы, бумага и текстиль, дерево, резина и кожа, минеральные, керамические и стеклянные материалы, лаки, краски и нефтепродукты, прочие;
- комплекты – сюда вносят ведомость эксплуатационных документов и комплекты монтажных и запасных частей, тары и т. п.

Формат	Зона	Позиция	Обозначения	Наименование	Кол-во	Примечание
				<u>Документация</u>		
A1			xxxx.xxxxxx.xxx. ВО	Привод	1	
A4			xxxx.xxxxxx.xxx. ПЗ	Пояснительная записка	55	
				<u>Сборочные единицы</u>		
A1		1	xxxx.xxxxxx.xxx.10. СБ	Редуктор	1	
		2	xxxx.xxxxxx.xxx.12. СБ	Муфта	1	
				<u>Детали</u>		
A1		3	xxxx.xxxxxx.xxx.10.1	Корпус	1	
A3		4	xxxx.xxxxxx.xxx.10.2	Вал	2	
A4		5	xxxx.xxxxxx.xxx.10.3	Шестерня	1	
A4		6	xxxx.xxxxxx.xxx.10.4	Колесо зубчатое	1	
A3		7	xxxx.xxxxxx.xxx.10.5	Крышка корпуса	1	
				<u>Стандартные изделия</u>		
				Винты ГОСТ 1491-80		
		8		M2*6	4	
		9		M3*10	2	
		10		Шарикоподшипник 210 ГОСТ 8338-75	2	
		11		Шарикоподшипник 410 ГОСТ 8338-75	2	
<b>Основная надпись</b>						

Рис. 2.2. Пример оформления спецификации

Спецификация включает в себя следующие графы:

- графа "Формат" - здесь приводят формат составляющих спецификацию документов;

- графа "Зона" - здесь указывают обозначение зоны, где находится номер позиции составной части изделия при разбивке поля чертежа на зоны;

- графа "Позиция" - здесь приводят порядковые номера составных частей специфицируемого изделия в последовательности их записи в спецификации (возможен пропуск отдельных номеров как резервных);

- графа "Обозначение" - здесь указываются обозначения документов, назначаемые по ГОСТ 2.201 или в соответствии с внутренними правилами предприятия;

- графа "Наименование" - здесь указывают название конструкторских документов;

- графа "Количество" - здесь указывают количество составных частей изделия, приведенных в спецификации, либо общее количество используемых материалов;

- графа "Примечание" - здесь приводят дополнительные сведения для планирования и организации производства и других целей.

*Ведомость спецификаций.* Содержит перечень всех спецификаций составных частей изделия с указанием их количества и принадлежности. Составляется, если количество специфицируемых изделий больше одного.

*Пояснительная записка.* Документ обязательный и содержит описание устройства, обоснование принятых при его разработке технических и технико-экономических решений. Она необходима для проверки правильности полученных результатов или воспроизведения проделанной работы. Составляется на листах формата А4, но входящий в неё графический материал может быть представлен и на листах большего формата. Листы имеют рамку, дополнительные графы и основную надпись по ГОСТ 2.104.

В общем случае записка включает разделы:

- введение;
- назначение и область применения проектируемого изделия, его техническая характеристика;
- описание и обоснование выбранной конструкции;
- расчёты, подтверждающие правильность принятых решений;
- ожидаемые технико-экономические показатели.

*Технические условия (ТУ).* Содержат требования к изделию (показатели качества и эксплуатационные характеристики), к его изготовлению, контролю, приёмке и поставке. Составляются для самостоятельно поставляемых изделий. ТУ являются выборкой из пояснительной записки сведений по изготовлению, эксплуатации и т.п. и сопровождают проектную графическую документацию на этапе изготовления и эксплуатации. Разновидностью ТУ являются правила по эксплуатации изделия.

*Программа и методика испытаний.* Содержит технические данные, которые подлежат проверке при испытании изделия, а также порядок и методы их контроля (вид, последовательность и технические средства испытания).

*Эксплуатационные документы.* Предназначены для обеспечения нормальной эксплуатации изделия, его обслуживания и ремонта.

*Патентный формуляр.* Содержит сведения о патентной чистоте спроектированного изделия, а также о созданных и использованных при его разработке изобретениях.

*Карта технического уровня и качества изделия.* Содержит данные, определяющие технический уровень (уровень качества) изделия и его соответствие лучшим отечественным и зарубежным достижениям, а также потребностям заказчика. Карта необходима для оценки целесообразности дальнейшей разработки и производства изделия.

## **Графическая конструкторская документация.**

В состав графической конструкторской документации входят ниже перечисленные документы.

*Чертёж детали.* Обязательный документ, который содержит изображение детали и все данные, необходимые для её изготовления и контроля. Основные требования и правила выполнения рабочих чертежей приведены в ГОСТ 2.107 и ГОСТ 2.109.

Чертежи разрабатывают на все детали, входящие в состав изделия. Допускается не выпускать чертежи в следующих случаях:

- на детали, изготавливаемые из фасонного или сортового материала отрезкой под прямым углом или из листового материала резкой по окружности или периметру прямоугольника без последующей обработки;
- на детали единичного производства, если их форма и размеры устанавливаются по месту (в процессе монтажа, сборки) или полностью определяются размерами, указанными на сборочном чертеже;
- на покупные детали, подвергаемые антикоррозионному или декоративному покрытию, не изменяющему характер сопряжения со смежными деталями. В этом случае указание о покрытиях приводят на сборочном чертеже.

Чертёж детали содержит:

- изображение детали. Количество изображений должно быть минимальным, но при этом давать полную и ясную информацию об этой детали, с размерами и предельными отклонениями, параметрами шероховатости и, при необходимости, отклонениями форм и расположения поверхностей;
- текстовую часть, состоящую из технических требований и технических характеристик;
- таблицы с параметрами, техническими требованиями, условными обозначениями и т. п.;

- основную надпись и дополнительные графы, предусмотренные стандартом на конструкторские документы;

- сведения о марке материала или заготовки, из которой деталь изготовлена (марка должна быть увязана с размерами заготовки и данными предприятия-изготовителя). Эти сведения помещают в графе основной надписи.

Обычно заполнение чертежа детали (как и других видов чертежей) ведется в следующем порядке (рис. 2.3):

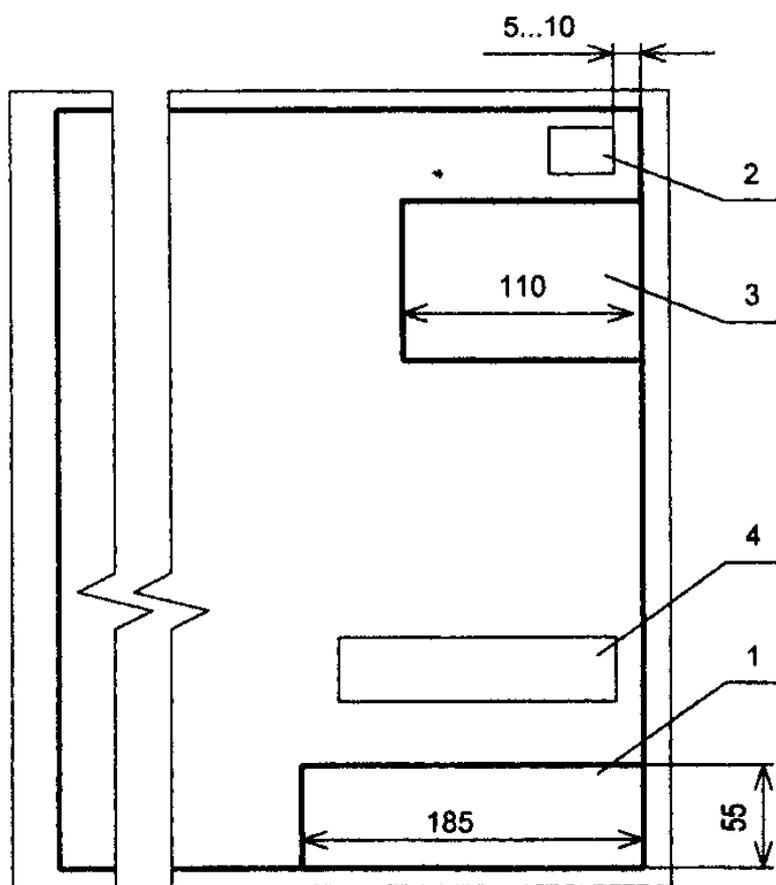


Рис. 2.3. Поле чертежа

(прямоугольники 2 и 4 указывают только положение надписей)

а) выбирают формат чертежа (из предварительной оценки потребного места под изображение детали в необходимом масштабе), наносят рамку, основную надпись (поз. 1), дополнительные графы;

б) отводят место под общее обозначение шероховатости или обозначение шероховатости неуказанных поверхностей (поз. 2);

в) отводят место под таблицу параметров, например для зубчатых колёс (цилиндрических, конических, червячных), которая содержит параметры зацепления и обязана располагаться, как показано на рисунке (поз. 3);

г) отводят место под текст технических требований (поз. 4), который располагается над основной надписью. Требования имеют сквозную нумерацию и следуют по пунктам, колонкой шириной не более 185 мм.

Рекомендуется следующая последовательность изложения технических требований (их содержание охватывает не только рабочие чертежи, но и другие виды графических документов):

- требования к материалу, заготовке, термообработке и физико-механическим характеристикам материала готовой детали (прочность, твёрдость), указание на материалы заменители;

- размеры и/или предельные отклонения размеров, формы, взаимного расположения, массы и т. п., например:

"Обработку по размерам [...] производить совместно с деталью...";

"Неуказанные предельные отклонения размеров...";

"Дисбаланс не более ...";

"Металл при балансировке удалять с ...";

"\*Размеры для справок";

"\*\*Размер обеспечивается инструментом";

"Неуказанные радиусы R ... мм";

- требования к качеству поверхности, указания об их отделке, например: "Покрытие -...", "Поверхность А полировать";

- зазоры, расположение отдельных элементов конструкции;

- требования к качеству изделия (бесшумность, самоторможение отсутствие дефектов и т. п.);

- условия и методы испытаний;

- указания по маркированию и клеймению;
- правила транспортирования и хранения;
- особые условия эксплуатации;
- ссылки на другие документы, содержащие необходимые технические требования, но не приведённые на данном чертеже.

Текстовые требования помещают только на первом листе, если чертёж выполняется более чем на двух листах.

*Сборочный чертёж.* Он содержит:

- изображение сборочной единицы, дающее представление о расположении и взаимной связи составных частей, соединяемых по данному чертежу, о возможности осуществления их сборки и контроля всего изделия;
- размеры, предельные отклонения и другие параметры и требования, которые должны быть выполнены и проконтролированы по данному чертежу (например, данные о поверхностях, полученных в результате совместной обработки нескольких деталей);
- указания о характере сопряжения и методах его осуществления, если оно обеспечивается подгонкой, пригонкой, сваркой и т. п.;
- номера позиций составных частей, входящих в изделие;
- основные характеристики изделия;
- габаритные, установочные и присоединительные размеры, а также необходимые справочные размеры.

Габаритные размеры задают предельные очертания изделия (например, наибольшую длину, высоту и ширину).

Установочные размеры определяют размеры частей изделия, по которым оно устанавливается на месте монтажа (например, размеры опорных лап, крепёжных отверстий и их координаты).

Присоединительные размеры определяют размеры частей изделия, посредством которых оно присоединяется к другому изделию (например, координаты и размер входного и выходного валов передачи).

Сборочные чертежи допускается изображать упрощённо, без технологических элементов конструкций (фаски, проточки, уклоны и т. п.). Номера позиций проставляют в соответствии с номерами, указанными в спецификации этой сборочной единицы. Номера располагают параллельно основной надписи чертежа вне контура изображения и группируют в колонку или в строчку, по возможности по одной линии.

На сборочных чертежах изделий, включающих детали, на которые допускается не выпускать чертежи, приводят дополнительные размеры, необходимые для изготовления этой детали, т.е. размеры, проставляемые на чертежах детали.

При указании технической характеристики изделия (например, мощности, передаточного числа и т. п.), её размещают отдельно от технических требований, с самостоятельной нумерацией пунктов, на свободном поле чертежа под заголовком "Техническая характеристика". При этом над техническими требованиями помещается заголовок "Технические требования" и оба эти заголовка не подчёркивают.

*Чертёж общего вида.* Обязательный документ. Содержит полное изображение изделия, наименования и обозначения составных его частей, необходимые для понимания его принципа работы и устройства. Составные части на чертеже указывают на полках-выносах или заносят в таблицу, подобную спецификации (рис. 2.2), обычно в следующем порядке (табл. 2.1):

- заимствованные изделия;
- покупные изделия;
- вновь разрабатываемые изделия.

Таблица может располагаться на чертеже или на отдельных листах формата А4, рассматриваемых как последующие листы чертежа.

На чертеже допускается помещать техническую характеристику изделия. Также на чертеже указывают размеры сопрягаемых поверхностей деталей, входящих в изделие. Эти данные необходимы для разработки

рабочих чертежей деталей. С целью пояснения устройства изделия на чертеже наносят габаритные, установочные и присоединительные размеры.

*Габаритный чертёж.* Содержит контурное (упрощенное) изображение изделия с габаритными, установочными и присоединительными размерами. Изделие показывают так, чтобы были видны крайние положения подвижных частей, которые изображают штрихпунктирными тонкими линиями. Установочные и присоединительные размеры, если они необходимы для увязки изделия с другими изделиями, проставляют с предельными отклонениями.

Таблица 2.1

Таблица составных частей на чертеже общего вида

Позиция	Обозначения	Наименование	Количество	Дополнительные указания
		<u>Заимствованные изделия</u>		
1	xxxx.xxxxxx.xxx	Стакан	1	
		<u>Покупные изделия</u>		
2	xxxx.xxxxxx.xxx	Шарикоподшипник 215 ГОСТ 8338-75	4	
5		Винт М5*16 ГОСТ 17473-80	12	
6		<u>Вновь разрабатываемые изделия</u>		
7	xxxx.xxxxxx.xxx	Корпус	1	
8	xxxx.xxxxxx.xxx	Крышка	4	

*Монтажный чертёж.* Он содержит контурное изображение изделия и данные, необходимые для его установки на месте применения и включает:

- упрощённое изображение монтируемого изделия. Подробно указываются только элементы конструкции, необходимые для правильного монтажа;

- изображение частей устройства (фундамента, рамы и т.п.), которые требуются для правильного определения места и способа крепления изделия;

- установочные и присоединительные размеры с предельными отклонениями;

- технические требования к монтажу изделия;

- перечень составных частей, необходимых для монтажа (на первом листе над основной надписью).

В перечне указывают сборочные единицы, детали и материалы, используемые при монтаже.

## **2.4. Научная документация. Научно-исследовательский отчёт**

Возможность разработки любого изделия базируется на результатах соответствующих научно-исследовательских работ. Описание содержания этих работ и полученные результаты приводят в научно-исследовательских отчётах, относящихся к текстовой документации. Отчёты оформляют по ГОСТ 7.32 на листах формата А4, во многом подобно пояснительной записке. Иллюстрации, таблицы и распечатки при необходимости могут располагаться на листах формата А3. В отличие от конструкторской документации листы научного отчёта не имеют вычерченных рамок и основной надписи. Номер страницы проставляется в правом верхнем углу.

Отчет, обычно, включает следующие разделы:

- титульный лист (обязательный раздел);
- список исполнителей;
- реферат (обязательный раздел). Здесь указывается объект исследований, цель работы, использованные методы и аппарат, приводятся полученные результаты, отмечается их новизна, степень внедрения, область

применения и практическая значимость работы, дается прогноз использования результатов на практике;

- содержание;
- перечень сокращений, условных обозначений, используемых терминов;
- введение (обязательный раздел). Здесь приводится оценка современного состояния решаемой проблемы, причины выполнения данной работы, перечень исходных данных. Показывается актуальность и новизна работы, ее связь с другими исследованиями;
- основная часть (обязательный раздел);
- заключение (обязательный раздел). Здесь даются выводы по результатам выполнения работы и рекомендации по их развитию и использованию, оценивается эффективность внедрения результатов;
- список использованных источников;
- приложения.

В *реферате* указывается направление и цель работы, тема исследований, использованные методы и аппаратура, приводятся полученные результаты, подчеркивается новизна и актуальность, практическая значимость и другие данные о проведенной научно-исследовательской работе. Реферат должен содержать: сведения об объеме отчёта, количестве иллюстраций, таблиц, приложений, количестве книг отчёта, количестве использованных источников, перечень ключевых слов.

*Содержание* включает введение, наименование всех разделов, подразделов, пунктов (если они имеют наименование) и заключение с указанием номеров страниц, с которых начинаются эти элементы отчёта о научно-исследовательской работе (НИР).

Принятые в отчёте малораспространенные *сокращения, условные обозначения, символы, единицы и термины* должны быть представлены в виде отдельного списка.

*Введение* должно содержать оценку современного состояния решаемой научно-технической проблемы, основание и исходные данные для разработки темы, обоснование необходимости проведения НИР, сведения о патентных исследованиях и выводы из них, сведения о метрологическом обеспечении НИР. Во введении должны быть показаны актуальность и новизна темы, связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами.

*Основная часть* должна содержать:

1) выбор направления исследований, методы решения задач и их сравнительную оценку, разработку общей методики проведения НИР;

2) теоретические или экспериментальные методы исследования, методы расчёта, обоснование необходимости проведения экспериментальных работ, принципы действия разработанных объектов, их характеристики, обоснование выбранного метрологического обеспечения, оценку правильности выбора средств измерений, оценку погрешности измерений, полученные экспериментальные данные;

3) обобщение результатов исследований, предложения по дальнейшим направлениям работ, оценку достоверности полученных результатов и их сравнение с аналогичными результатами отечественных и зарубежных работ, обоснование необходимости проведения дополнительных исследований, отрицательные результаты, приводящие к необходимости прекращения дальнейших исследований.

Основную часть отчёта следует делить на разделы, подразделы, пункты и подпункты. Каждый пункт должен содержать законченную информацию. Основную часть излагают в виде текста, таблиц и иллюстраций.

*Заключение* должно содержать краткие выводы по результатам выполненной НИР, оценку полноты решений поставленных задач, разработку рекомендаций и исходных данных по конкретному использованию результатов НИР, оценку технико-экономической эффективности внедрения.

*В списке использованных источников* сведения об источниках следует располагать в порядке появления ссылок на источники в тексте отчета и нумеровать арабскими цифрами с точкой.

*В приложения* рекомендуется включать материалы, связанные с выполненной НИР, которые по каким-либо причинам не могут быть включены в основную часть. В приложения могут быть включены:

- 1) материалы, дополняющие отчёт;
- 2) промежуточные доказательства, формулы и расчёты;
- 3) таблицы вспомогательных цифровых данных;
- 4) протоколы испытаний;
- 5) описание аппаратуры и приборов, применяемых при проведении экспериментов, измерений и испытаний;
- 6) заключение метрологической экспертизы;
- 7) инструкции, методики, описания алгоритмов и программ задач решаемых ЭВМ, разработанных в процессе выполнения НИР;
- 8) иллюстрации вспомогательного характера.

## **2.5. Автоматизация оформления документации**

Оформление проектной документации имеет следующие особенности:

- большая трудоёмкость и продолжительность составления и согласования документации (исследования показывают, что при обычном "ручном" проектировании на это уходит порядка 60...80% всего времени разработки изделия);

- оформление результатов работ регламентируется стандартами и, по сравнению с другими видами работ, максимально формализовано, здесь главное - точность и пунктуальность.

Именно такими главными достоинствами и обладают вычислительные комплексы работающие быстро, без ошибок и отступлений от правил, по жёстким алгоритмам. Поэтому в настоящее время оформление проектной

документации является наиболее автоматизируемым видом проектных работ. Задача проектировщика в такой ситуации сводится к управлению (выбор объекта, вида документации, компоновка изображений и т. п.) и контролю процессов автоматизированного документирования.

В свою очередь, автоматизация меняет вид и характер документации:

- отсутствуют ранее традиционные носители информации, так называемые "твердые копии" - чертежи и текстовые документы на бумаге. Информация хранится на компьютерных носителях. В процессе работы она считывается с носителя и при необходимости передаётся по электронной почте или с помощью иных средств связи. И только при необходимости оформляется в виде твердых копий;

- в современных системах в качестве результатов проектирования уже выступают команды для автоматизированных технологических комплексов с программным управлением. Автоматизированная система сама увязывает отдельные части проектируемого объекта и проверяет состыковку размеров, подготавливает команды для элементов оборудования комплексов. Такая система ориентирована, прежде всего, на получение готового изделия, а выпуск документации становится её дополнительной функцией.

Автоматизация документирования обладает следующими достоинствами:

- возможность активного хранения большого объёма информации в виде баз данных (сочетание хранения с оперативным доступом и использованием в работе);

- быстрота поиска нужной информации;

- учёт всех требований стандартов и других нормативных документов, оперативное внесение изменений при изменении или введении новых стандартов, замене размерностей физических величин и т. п.;

- рентабельность применения, поскольку резко снижаются сроки проектных работ, повышается качество их результата (вследствие

многовариантности и оптимизации, повышения точности расчётов, сведения до минимума субъективных ошибок).

Применение автоматизированных систем, однако, не освобождает конструктора от знаний состава, порядка и правил документирования: проектировщик назначает и формирует необходимые изображения (особенно нетиповых деталей), размещает их в поле чертежа, управляет составлением другой необходимой документации и т. д. (т.е. происходит лишь облегчение его физического труда).

## **2.6. Основные направления повышения качества машин**

Важность проблемы повышения надёжности непрерывно возрастает с интенсификацией технологических процессов, повышением производительности оборудования и увеличением воздействующих на него нагрузок. Низкая надёжность металлургического оборудования приводит к вынужденным простоям, которые влекут за собой невосполнимые потери в производстве металла и требуют существенных затрат на восстановление его работоспособности.

По подсчётам специалистов на все виды ремонтов технологического оборудования ежегодно расходуется около 25% капитальных вложений. В машиностроении и металлообработке на ремонтных работах занято более 20% всех рабочих, а количество проката чёрных металлов, расходуемого на ремонт машин и оборудования, составляет более 15% годовой потребности.

Металлургическое оборудование имеет весьма низкие показатели эксплуатационной надёжности и долговечности, поэтому для него проблема повышения надёжности приобретает особое значение. В ремонтной службе занято около 30% общей численности производственного персонала, а стоимость механического оборудования достигает 40% общей стоимости основных производственных фондов. По разным источникам на техническое

обслуживание и ремонт оборудования за время его эксплуатации затрачивается в 5...10 раз больше средств, чем на изготовление нового.

Разработчики оборудования, технологический и эксплуатационный персонал должны уметь правильно выбирать и использовать наиболее эффективные средства повышения надёжности в каждом конкретном случае. Оптимальный уровень надёжности и срока службы следует назначать с учетом экономической целесообразности принимаемых решений.

Мероприятия, проводимые по обеспечению высокого качества и надёжности оборудования, затрагивают все стадии его создания и реализации, включая этапы проектирования, изготовления, испытания, хранения и эксплуатации. Каждый этап жизненного цикла вносит свой вклад в решение задачи создания оборудования требуемого уровня надёжности с наименьшими затратами времени и средств.

Основные решения по обеспечению надёжности оборудования, принятые на этапах его проектирования и изготовления, сказываются на его эксплуатационных и экономических показателях. Поэтому необходимо выявлять связи между показателями надёжности и возможностями их повышения на каждом этапе создания и реализации оборудования.

Особое значение для создания высоконадёжных машин и агрегатов имеет этап их расчёта и проектирования, когда закладываются их основные технические характеристики. При проектировании оборудования устанавливаются и обосновываются необходимые требования к надёжности, что обеспечивается за счёт конструкции и применяемых материалов. На этом этапе разрабатываются методы защиты оборудования от вредных воздействий, рассматриваются возможности автоматически восстанавливать утраченную работоспособность, оценивается приспособленность к ремонту и техническому обслуживанию. Для обеспечения оптимальных показателей надёжности оборудования конструктор должен на этапе проектирования предусмотреть определенный их уровень, который должен гарантировать работу оборудования в течение заданного периода времени в определённых

условиях эксплуатации при минимальных затратах на его изготовление и эксплуатацию.

При изготовлении (производстве) оборудования его надёжность зависит от качества изготовления деталей и сборочных единиц и методов их контроля, возможностей управления ходом технологического процесса, качества сборки оборудования в целом и его узлов, методов испытания и доводки и других показателей технологического процесса.

При эксплуатации оборудования реализуется его надёжность, при этом она зависит от условий эксплуатации, принятой системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР), режимов работы и других факторов.

Уровень надёжности машины должен быть таким, чтобы при её использовании в оговоренных технических условиях (ТУ) ситуациях не возникали отказы, т.е. не нарушалась её работоспособность. Кроме того, желательно, чтобы оборудование имело запас надёжности для повышения сопротивляемости экстремальным воздействиям, когда машина попадает в условия, не предусмотренные ТУ. Запас надёжности также необходим для обеспечения работоспособности оборудования при его износе, который приводит к постепенному ухудшению технических характеристик машины. Поэтому, чем выше запас надёжности, тем дольше при прочих равных условиях, машина будет находиться в работоспособном состоянии.

Современный уровень развития техники позволяет достичь практически любых показателей качества и надёжности изделия. Однако сделанные затраты на эти мероприятия могут быть столь высоки, что эффект от повышенной надёжности объекта не возместит их, и суммарный результат от проведённых мероприятий будет отрицательным. Таким образом, высоконадёжную машину целесообразно создавать не только по требованиям безотказности и престижности, но и с позиции экономической эффективности.

В общем случае, суммарный экономический эффект (прибыль)  $C_{\text{эфф}}$  от использования оборудования определяется разницей между доходом  $C_{\text{дох}}$ ,

который обеспечивает применение данного оборудования, и затратами на создание и эксплуатацию оборудования  $C_{зат} = C_{изг} + C_{экс}$  (рис. 2.4).

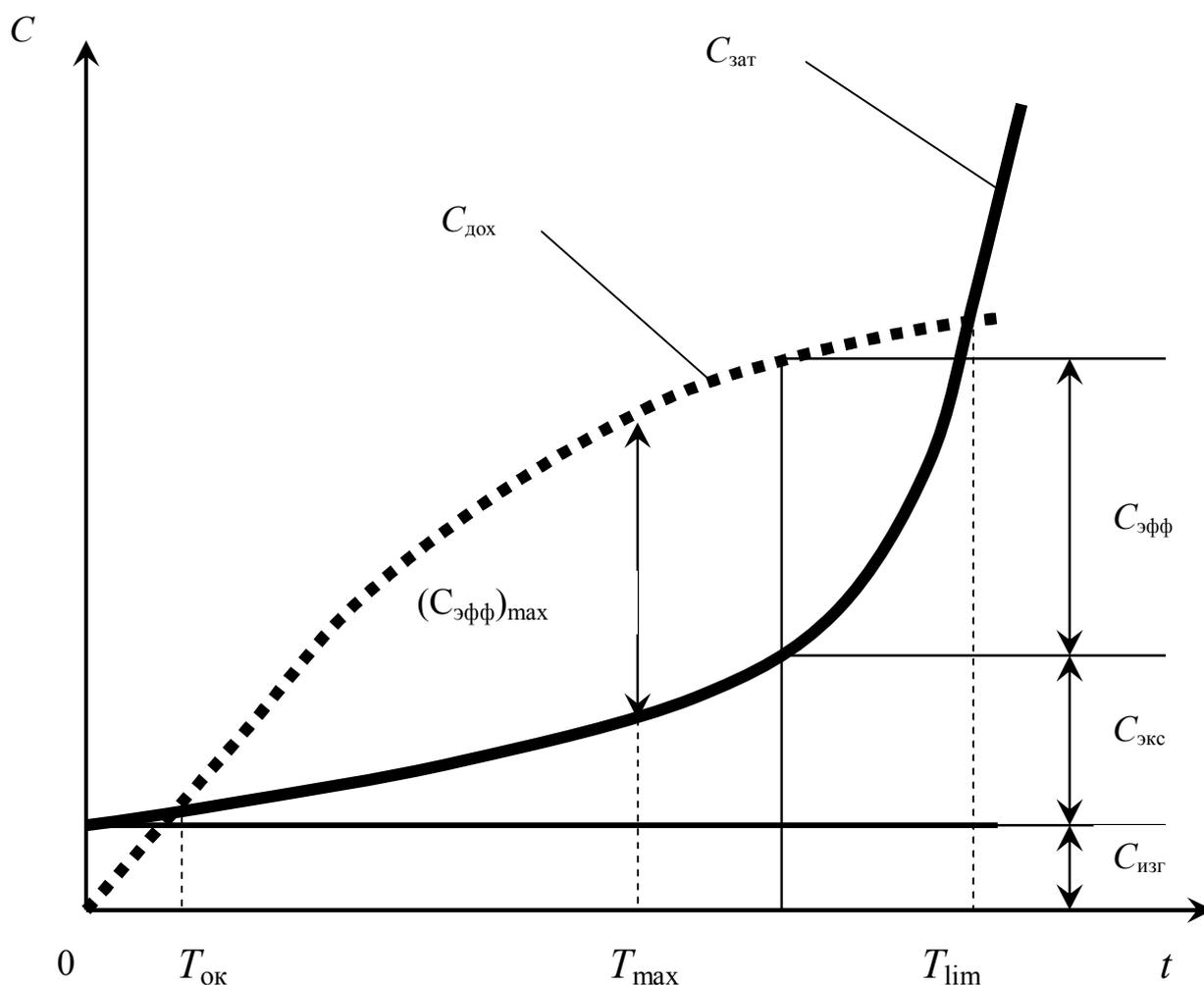


Рис. 2.4. Изменение экономической эффективности  $C$  технологического оборудования во времени:

$C_{изг}$  — начальная стоимость;  $C_{экс}$  — эксплуатационные расходы;  $C_{зат}$  — суммарные затраты;  $C_{дох}$  — доходы от применения;  $C_{эфф}$  — положительный эффект от применения;  $T_{ок}$  — срок окупаемости;  $T_{lim}$  — предельный срок, соответствующий нулевой прибыли;  $T_{max}$  — срок эксплуатации, соответствующий максимальной прибыли.

Затраты на создание оборудования  $C_{изг}$  включают все этапы от его проектирования и изготовления до пуска в эксплуатацию. Они отражают начальную стоимость оборудования в зависимости от его конструкции, технологии изготовления, выбранных материалов и др. Их можно

рассматривать как условно постоянные в процессе эксплуатации. Затраты на эксплуатацию  $C_{\text{экс}}$  связаны с расходами, связанными с поддержанием и восстановлением работоспособности оборудования. Они включают затраты на техническое обслуживание и ремонт. Эти затраты, как правило, возрастают с течением времени вследствие старения элементов оборудования и ухудшении его технических характеристик, что приводит к увеличению средств на проведение ТОиР.

Применение оборудование дает положительный экономический эффект (доход)  $C_{\text{дох}}$ , который для технологического оборудования обусловлен выпуском продукции, повышения его качества и т.п. Интенсивность роста величины  $C_{\text{дох}}$  во времени имеет тенденцию к снижению, так как в процессе работы оборудования увеличивается продолжительность и частота ремонтов и технического обслуживания.

Кривая  $C_{\text{дох}}$  два раза пересекает кривую суммарных  $C_{\text{зат}}$ , а разница между ними показывает, какая прибыль получена в каждый период времени при использовании оборудования по назначению.

Период времени до первой точки пересечения соответствует сроку окупаемости  $t = T_{\text{ок}}$ , к этому времени оборудование окупило средства, вложенные при его приобретении. Начиная с этого момента, т.е. при  $t > T_{\text{ок}}$ , оборудование дает прибыль  $C_{\text{эфф}}$ .

При некотором значении  $T_{\text{max}}$  значение прибыли достигает максимального значения  $(C_{\text{эфф}})_{\text{max}}$ , после чего постепенно снижается из-за роста эксплуатационных затрат  $C_{\text{экс}}$ .

Вторая точка пересечения  $t = T_{\text{lim}}$  кривых  $C_{\text{дох}}$  и  $C_{\text{зат}}$  соответствует случаю нулевой прибыли  $C_{\text{эфф}} = 0$ , когда доход от использования оборудования полностью идёт на эксплуатационные расходы. При  $t > T_{\text{lim}}$  оборудование эксплуатировать экономически нецелесообразно, поскольку затраты на ТОиР превышают экономический эффект от его применения.

Продолжительность экономически целесообразной эксплуатации  $T_{\text{экс}}$  оборудования находится в диапазоне  $T_{\text{max}} \leq T_{\text{экс}} < T_{\text{lim}}$ .

## 2.7. Повышение качества машин при проектировании

Одним из разделов технического задания на разработку любой технической системы является раздел, определяющий требования к надёжности. В нем указывают количественные показатели надёжности, которые необходимо подтверждать на каждом этапе создания системы. Требования к количественным показателям надёжности возрастают тогда, когда отказы технической системы приводят к большим затратам материальных средств, либо угрожают безопасности жизнедеятельности и экологии окружающей среды.

В процессе проектирования необходимо стремиться не только к снижению массы и упрощению конструкции оборудования, но и к повышению безотказности и долговечности деталей, сборочных единиц и оборудования в целом. Выполнение этих требований достигается путём рационального выбора конструктивных решений и применения соответствующих материалов, различных видов обработки, упрочнения и других методов.

Конструктивные методы повышения надёжности предусматривают создание запасов прочности деталей машин и элементов конструкций, оптимизацию режимов работы и упрощение конструкции оборудования, использование стандартных деталей и сборочных единиц, обоснованное использование методов резервирования. Кроме общих правил конструирования при создании технологического оборудования следует предусматривать удобную замену быстро выходящих из строя деталей и сборочных единиц, т.е. обеспечить высокие показатели ремонтпригодности.

Достижение оптимальной прочности базовых деталей и узлов на стадии проектирования машин, совершенствование системы смазки и защиты от пыли и грязи трущихся поверхностей, применение в конструкции оборудования прогрессивных видов материалов позволяют сократить

физический износ оборудования в процессе эксплуатации в несколько раз. Всё это даёт возможность значительно уменьшить объём ремонтов.

Повышение уровня унификации и стандартизации в конструкции машин на стадии проектирования уменьшает объём работ по изготовлению более трудоёмких оригинальных запасных частей для ремонта.

Упрощение конструкций машин, повышение их ремонтной технологичности и снижение сложности ремонта повышают технический уровень проектируемого оборудования и эффективность его ремонтного обслуживания. Здесь должен работать один из принципов - если деталь неэкономична или её технически сложно выполнить с заданными показателями долговечности, она должна иметь повышенную ремонтпригодность, быть легко и быстро съёмной. Рациональное расположение деталей и узлов в конструкции машин позволяет при ТОиР значительно уменьшить объём демонтажно-разборочных и сборочно-монтажных работ, составляющих в общей трудоёмкости капитального ремонта до 40...50%.

Интенсификация рабочих процессов приводит к повышению динамических нагрузок, что приводит к поломкам деталей, и, как следствие, к снижению производительности оборудования и увеличению затрат на эксплуатацию и ремонт. В этом случае повышение надёжности деталей путём увеличения их статической прочности без расчёта их на выносливость, бессмысленно, так как увеличения размеров и массы деталей приводит к ещё большему росту динамических нагрузок и вероятности разрушения.

Увеличение срока службы деталей, работающих в условиях циклического нагружения, обеспечивается за счёт ослабления концентрации местных напряжений. Концентрацию напряжений можно уменьшить приданием детали плавных очертаний, применения разгрузочных канавок и отверстий, удалением неработающего материала, перемещением источников концентрации в менее нагруженные зоны и др. Например, снижение прочности валов от напрессованных деталей можно уменьшить за счёт

выполнения круговых выточек у кромок, применения плавных галтелей, обкатки роликами поверхности вала.

Важное место в обеспечении надёжности системы занимает подбор металла, из которого конструируют силовые узлы металлоконструкций, так как от них зависит надёжность и долговечность изделия в целом. Для изделий, работающих в стационарных условиях, чаще всего используют обычные углеродистые стали, а для изделий, работающих в условиях переменных нагрузок с высокой интенсивностью, - высоколегированные. В зависимости от внешних воздействующих факторов и условий нагружения подбирают соответствующие материалы с определенными характеристиками. Так, детали, для которых основным критерием работоспособности является контактная прочность (зубчатые колёса, звездочки цепных передач, направляющие и др.), следует изготавливать из металлов, позволяющих упрочнять рабочие поверхности до высокой твёрдости при сохранении необходимой пластичности сердцевины.

Надёжность технологического оборудования в значительной мере зависит от состояния и физико-механических свойств поверхностных слоёв деталей, где происходят процессы износа, а также зарождаются и развиваются процессы усталостного разрушения. В настоящее время разработано много методов, позволяющих изменять строение и свойства поверхностных слоёв деталей в нужном направлении или создавать слои с заданным комплексом физико-механических и служебных свойств. В металлургическом машиностроении широко применяют упрочнение новых и восстановление изношенных деталей машин наплавкой или напылением. Упрочняющая обработка сменных деталей может обеспечить необходимую долговечность до замены всего узла или агрегата в целом. Использование износостойких материалов повышает срок службы деталей в 1,5...3 раза, что позволяет сократить расход металла и уменьшить трудоёмкость ремонта.

Анализ и прогнозирование надёжности на стадии проектирования даёт необходимые данные для оценки конструкции. Такой анализ проводят для

каждого варианта конструкции, а также после внесения конструктивных изменений. При обнаружении конструктивных недостатков, снижающих уровень надёжности системы, проводят конструктивные изменения и корректируют техническую документацию.

Таким образом, еще на стадии проектирования должны быть заложены основы для создания технологического оборудования, сохраняющего работоспособность в различных условиях эксплуатации, а предусмотренная при этом надёжность должна быть обеспечена в процессах его изготовления и эксплуатации.

## **2.8. Повышение качества машин при изготовлении**

Организация производства машин, применяемые технологические процессы и методы контроля, оказывает решающее значение на показатели надёжности. Все компоненты технологического процесса (метод обработки, применяемое оборудование, последовательность операций, режимы обработки и др.) определяет показатели качества машины. Известно, что аналогичные детали, изготовленные различным образом, имеют разный предел выносливости, даже если для них применен один и тот же материал.

Показатели качества машины, сформированные в процессе производства, определяют её эксплуатационные свойства, такие как износостойкость, прочность, жёсткость и др. Повышение стабильности технологического процесса и контроль, исключающий изготовление деталей с параметрами, не соответствующими заданным, обеспечивают выпуск надёжных машин.

Износостойкость зависит от состава, структуры и механических характеристик материалов, на которые влияют виды и режимы обработки. Во многом износостойкость определяется геометрическими и физико-химическими параметрами поверхностного слоя, которые формируются при выполнении технологических операций.

На усталостную прочность деталей влияют механические свойства материалов, состояние поверхностных слоёв, наличие дефектов и концентраторов напряжений. Так, при механической обработке в поверхностном слое детали возникают растягивающие остаточные напряжения, которые снижают предел выносливости. Применение технологических процессов, создающих в поверхностном слое сжимающие напряжения, повышает сопротивление детали усталостному разрушению. Этот факт следует учитывать в случае изготовления деталей, работающих при знакопеременных нагрузках и высоких температурах.

Для защиты металлов от коррозии широко применяют различные виды покрытий (электролитические, химические, полимерные и др.). Коррозионная стойкость этих покрытий, находящихся под воздействием агрессивных сред, зависит не только от вида и химического состава, но и от режимов его нанесения и возможности регулировать и контролировать протекание этого процесса. Интенсивные коррозионные разрушения характерны для конструкций, работающих в жидких средах, вызывающих электрохимическую коррозию. Особенно опасный вид разрушения – коррозионное растрескивание – возникает при одновременном действии агрессивной среды и повторно-переменных нагрузок.

Одним из основных методов обеспечения надёжности технологических процессов является контроль качества и надёжности продукции в процессе её изготовления на всех стадиях производства и испытаний.

На предприятиях промышленности применяют два метода статистического контроля качества: текущий контроль технологического процесса и выборочный метод контроля. Метод статистического контроля (регулирования) качества позволяет своевременно предупреждать брак в производстве и, таким образом, непосредственно вмешиваться в технологический процесс. Выборочный метод контроля не оказывает непосредственного влияния на производство, так как он служит для контроля готовой продукции, позволяет выявить объём брака, причины его

возникновения в технологическом процессе или же качественные недостатки материала.

Анализ точности и стабильности технологических процессов позволяет выявить и исключить факторы, отрицательно влияющие на качество изделия.

## **2.9. Повышение качества машин при эксплуатации**

Для повышения надёжности сложных технических систем в условиях эксплуатации проводят ряд мероприятий, которые можно подразделить на следующие четыре группы:

- 1) разработку научных методов эксплуатации;
- 2) сбор, анализ и обобщение опыта эксплуатации;
- 3) связь проектирования с производством изделий машиностроения;
- 4) повышение квалификации обслуживающего персонала.

Научные методы эксплуатации включают в себя научно обоснованные методы подготовки изделия к работе, проведения технического обслуживания, ремонта и других мероприятий по повышению надёжности сложных технических систем в процессе их эксплуатации. Порядок и технологию проведения этих мероприятий описывают в соответствующих руководствах и инструкциях по эксплуатации конкретных изделий. Более качественное выполнение эксплуатационных мероприятий по обеспечению надёжности изделий машиностроения обеспечивается результатами статистического исследования надёжности этих изделий. При эксплуатации изделий большую роль играет накопленный опыт. Значительную часть опыта эксплуатации используют для решения частных организационно-технических мероприятий. Однако накопленные данные необходимо использовать не только для решения задач сегодняшнего дня, но и для создания будущих изделий с высокой надёжностью.

Большое значение имеет правильная организация сбора сведений об отказах. Содержание мероприятий по сбору таких сведений определяется

типом изделий и особенностями эксплуатации этих изделий. Возможными источниками статистической информации могут быть сведения, полученные по результатам различных видов испытаний и эксплуатации, которые оформляются периодически в виде отчётов о техническом состоянии и надёжности изделий. Изучение особенностей их поведения даёт возможность использовать накопленные данные для проектирования будущих изделий. Таким образом, сбор и обобщение данных об отказах изделий - одна из важнейших задач, на которую должно быть обращено особое внимание.

Эффективность эксплуатационных мероприятий во многом зависит от квалификации обслуживающего персонала. Однако влияние этого фактора неодинаково. Так, например, при выполнении в процессе обслуживания довольно простых операций влияние высокой квалификации работника сказывается мало, и наоборот, квалификация обслуживающего персонала играет большую роль при выполнении сложных операций, связанных с принятием субъективных решений (например, при регулировании элементов гидроприводов, настройке нажимных устройств, монтаже подшипников жидкостного трения и т.д.).

Для сложных технических систем в нормативно-технической документации устанавливают виды технических обслуживания (ТО-1, ТО-2,...) и ремонтов (текущий, средний, капитальный). На стадии эксплуатации изделий проявляются технико-экономические последствия низкой надёжности, связанные с простоями техники и затратами на устранение отказов и приобретение запасных частей. С целью поддержания надёжности изделий на заданном уровне в процессе эксплуатации необходимо проводить комплекс мероприятий, который может быть представлен в виде двух групп: мероприятия по соблюдению правил и режимов эксплуатации; мероприятия по восстановлению работоспособного состояния.

К первой группе мероприятий относятся обучение обслуживающего персонала, соблюдение требований эксплуатационной документации, последовательности и точности проводимых работ при техническом

обслуживании, диагностический контроль параметров и наличие запасных частей, осуществление авторского надзора и т.п.

К основным мероприятиям второй группы относятся корректирование системы технического обслуживания, периодический контроль за состоянием изделия и определение средствами технического диагностирования остаточного ресурса и предельного состояния, внедрение современной технологии ремонта, анализ причин отказов и организация обратной связи с разработчиками и изготовителями изделий.

Некоторые изделия значительную часть времени эксплуатации находятся в состоянии хранения, т.е. не связаны с выполнением основных задач. Для таких изделий преобладающая часть отказов связана с коррозией, а также воздействием пыли, грязи, температуры и влаги. Для изделий, которые большую часть времени используются для выполнения соответствующей работы, преобладающая часть отказов связана с износом, усталостью или механическим повреждением деталей и узлов. В состоянии простоя интенсивность отказов элементов существенно меньше, чем в рабочем состоянии. Так, например, для электромеханического оборудования это соотношение соответствует 1:10, для механических элементов это соотношение составляет 1:30.

Необходимо отметить, что с усложнением техники и расширением областей её использования возрастает роль этапа эксплуатации в суммарных затратах на создание и использование технических систем. Затраты на поддержание в работоспособном состоянии оборудования за счёт технического обслуживания и ремонтов в несколько раз превышают стоимость новых изделий. Например, затраты на ТОиР металлургического оборудования за время его эксплуатации в 5 и более раз больше средств, потраченных на его приобретение.

Техническая политика предприятий должна быть направлена на снижение объёмов и сроков проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту техники за счёт повышения надёжности и

долговечности основных узлов. Для поддержания надёжности машины в процессе эксплуатации на заданном уровне объём производства запасных частей должен составлять 25-30 % стоимости машин.

Классификация основных способов повышения работоспособности и долговечности деталей и узлов технологического оборудования приведена на рис. 2.5; к ним следует добавить мероприятия по повышению надёжности при конструировании, изготовлении, сборке и монтаже.



Рис. 2.5. Классификация мероприятий по повышению эксплуатационной надёжности технологического оборудования

Конструкторские мероприятия по повышению надёжности можно условно разделить на следующие группы:

1) изменение конструкции, которое включает разъединение трущихся поверхностей, установление оптимальных зазоров, увеличение площади поверхности трения, улучшение контактов, равномерное распределение нагрузки и др.;

2) применение дополнительных устройств, таких как компенсаторы износа, фильтры, протекторы для защиты от пыли, съёмники быстро изнашивающихся деталей, предохранители и др.;

3) улучшение характеристик материалов за счёт применения высокопрочных материалов, антифрикционных материалов, упрочненных накладок, проката переменного сечения и др.;

4) улучшение смазки, в том числе обеспечение жидкостного трения, герметизация узлов трения, применение гидродинамической и аэрозольной смазки, автоматизация смазки и др.

Технологические мероприятия по повышению надёжности можно условно разделить на следующие группы:

1) поверхностная пластическая деформация (наклеп), основными видами которой являются дробеструйная обработка, обкатка шариками и роликами, термомеханическая обработка, электромеханическое сглаживание и др.;

2) термическая обработка, в том числе поверхностная газовая закалка, закалка в электролите, закалка токами высокой частоты, упрочнение взрывом, цементация и др.;

3) химико-термическая обработка – азотирование, хромирование, цианирование, алитирование, никелирование и др.;

4) наплавка и напыление, к которым относятся газовая, электродуговая и электрошлаковая наплавка, газовая металлизация, плазменное напыление и др.;

5) гальваническое нанесение покрытий – цинкование, хромирование, никелирование, борирование, эмалирование, фосфатирование и др.

Организационные мероприятия по повышению надёжности включают работы по уходу, профилактике, обслуживанию и ремонту: контроль состояния и режимов работы оборудования, планово-предупредительный ремонт, уход за поверхностями трения, обслуживание смазочных систем, повышение квалификации и ответственности рабочих и др.

## 2.10. Экономический подход к надёжности машин

Принцип устранения причин, которые снижают надёжность функционирования оборудования, действует на всех стадиях жизненного цикла его существования: проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации. Эксплуатационная надёжность оборудования зависит не только от базовой надёжности, которая создается на первых трех стадиях, но и от уровня его эксплуатации, системы технического обслуживания и ремонта. Необходимо отметить, что повышение надёжности является не самоцелью, а средством достижения эффективности функционирования оборудования. Теоретически возможно достижение уровня надёжности, близкого к единице, но затраты для обеспечения этого показателя могут свести на нет целесообразность его применения.

На рис. 2.6 приведена качественная зависимость уровня надёжности и затрат на создание и эксплуатацию оборудования. Из анализа взаимосвязи уровня надёжности и всех видов затрат видно, что с увеличением базовой надёжности затраты на создание оборудования возрастают. Особенно значителен этот рост при величине надёжности 0,8 и выше.

Затраты на ТОиР и модернизацию с увеличением надёжности, естественно, уменьшаются. Для иллюстрации влияния модернизации на общие затраты на графике показана кривая без учёта модернизации. Судя по общим затратам, оптимальный уровень надёжности без модернизации составляет всего 0,7, что не соответствует требованиям металлургического производства.

Модернизация позволяет повысить эксплуатационную надёжность оборудования, но суммарные затраты будут выше, чем при использовании оборудования с более высокой базовой надёжностью. Минимум общих затрат соответствует оптимальной эксплуатационной надёжности 0,8...0,9, что следует считать средней заданной величиной надёжности

металлургического оборудования. Обычно этот уровень лежит в пределах 0,8...0,95.

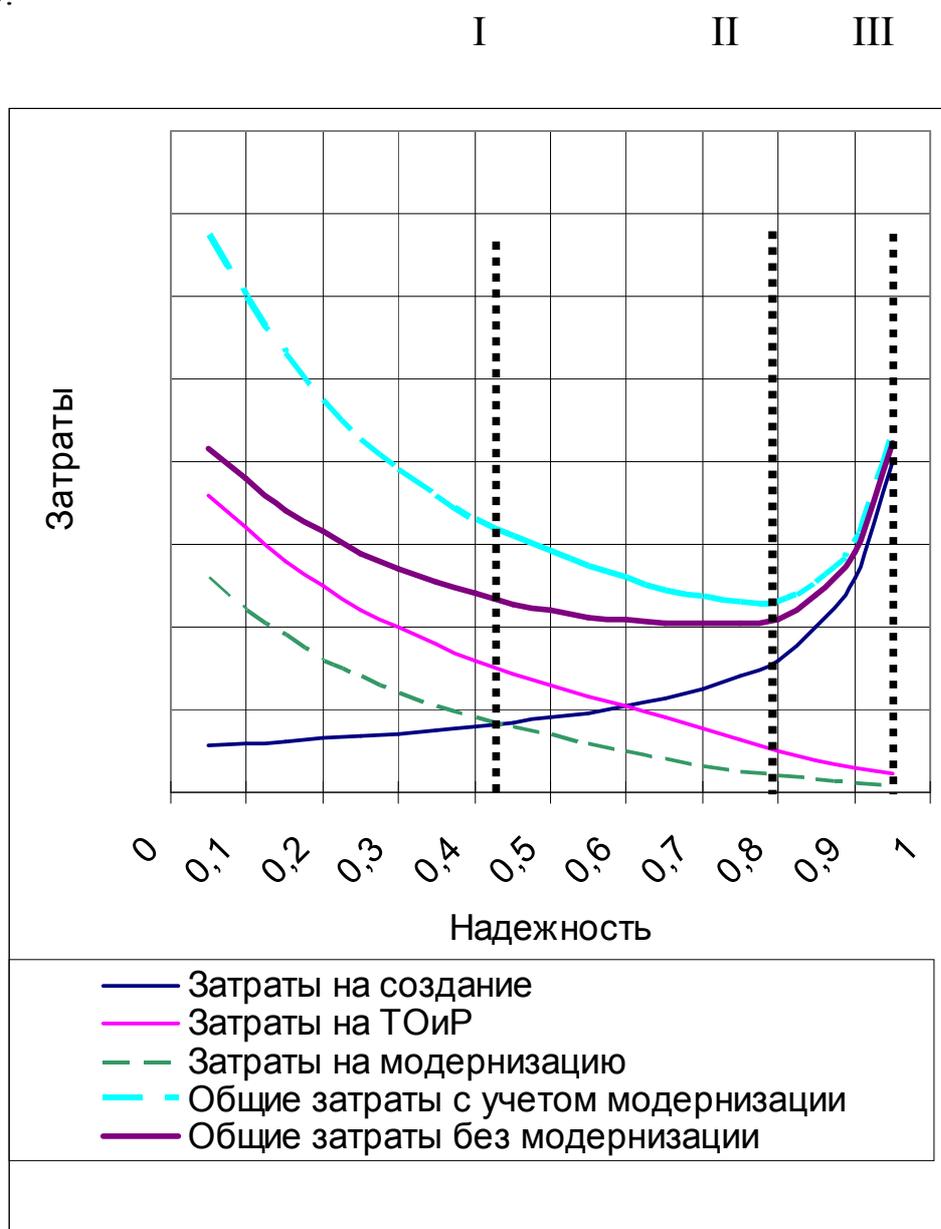


Рис. 2.6. Изменение составляющих общих затрат в зависимости от заданной величины надёжности оборудования

На основе анализа можно сделать важный вывод о том, что общие затраты примерно одинаковы при надёжности, равной 0,7...0,85. Следовательно, экономически выгоднее создавать и применять более надёжное оборудование.

Другими словами, лучше купить более дорогое и надёжное оборудование, чем дешёвое и ненадёжное, которое после ввода в

эксплуатацию постоянно нуждается в дорогостоящих ремонтах и модернизации. На рисунке 2.6 тремя вертикальными линиями (I, II, III) выделены три типа оборудования. Оборудование I имеет низкую надёжность и поэтому для её нормального функционирования необходимы значительные затраты на ТОиР и модернизация, при этом общие затраты превосходят затраты на приобретение абсолютно надёжного оборудования. Оборудование III характеризуется повышенными требованиями к надёжности, т.е. относится к оборудованию первой группы надёжности. Оборудование II имеет оптимальные показатели надёжности и общих затрат.

Определение оптимальной долговечности оборудования также основано на экономическом подходе. На рис. 2.7 показано изменение себестоимости продукции в зависимости от срока службы.

Суммированием всех затрат получают общую зависимость себестоимости продукции от срока службы машины. Она имеет чётко выраженный минимум  $C_{\min}$ , который соответствует определённому сроку службы. Срок службы машины, при котором достигается наименьшая себестоимость единицы продукции, считают оптимальным сроком  $T_{\text{опт}}$  её службы по физическому износу. Работа оборудования в течение более длительного срока приводит к увеличению удельных эксплуатационных затрат за счёт более высоких затрат на ТОиР.

При современном уровне производства общие затраты в металлургии на ТОиР оборудования в процессе его эксплуатации достигают 10...15% от общих затрат на производство товарной продукции. Интенсивное использование существующего оборудования, недостаточные темпы его обновления и повышение количества и сложности нового оборудования приводит к абсолютному и относительному росту затрат на ТОиР.

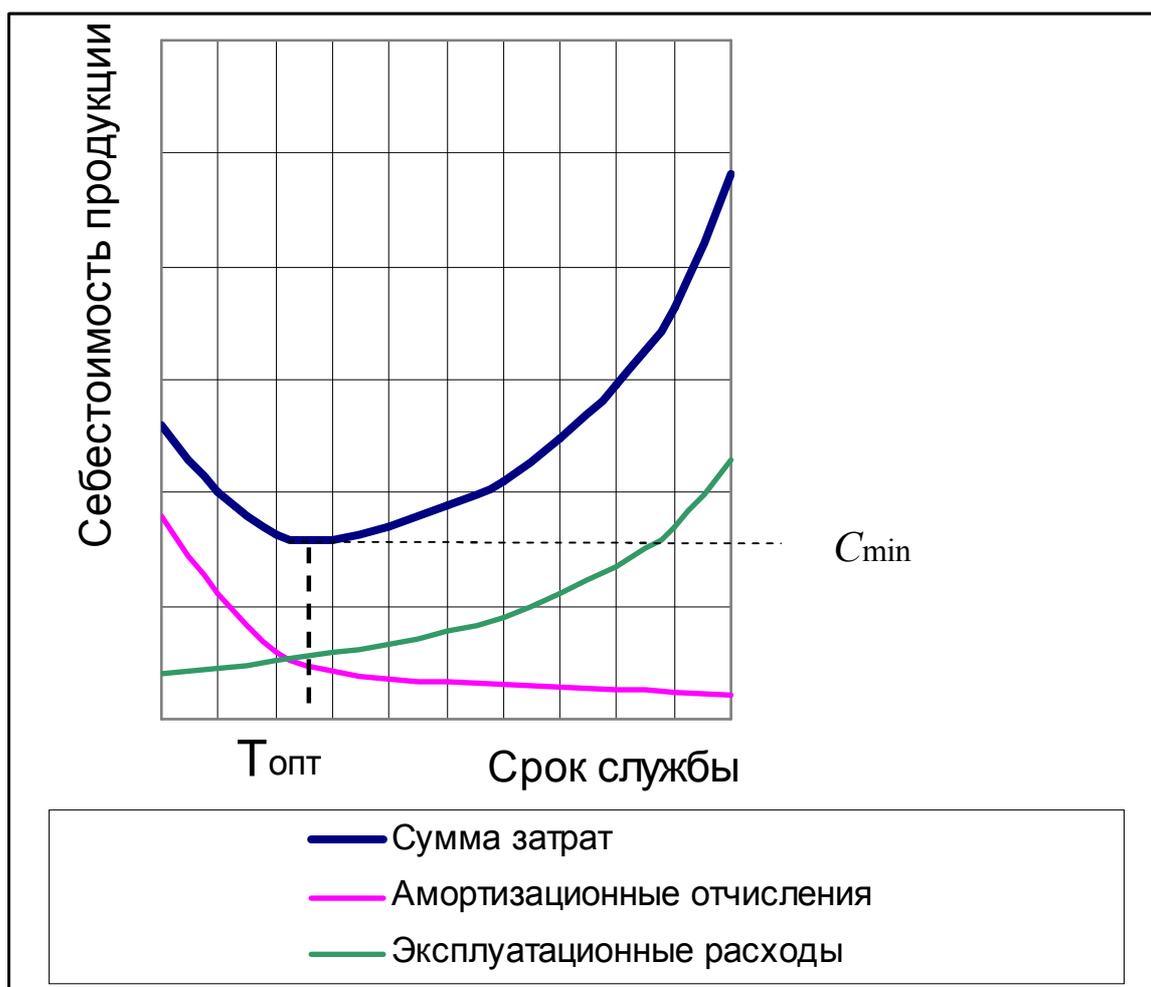


Рис. 2.7. Взаимосвязь между себестоимостью продукции и сроком службы оборудования

Повышение уровня эксплуатационной надёжности связано с затратами на получение и обработку информации о состоянии оборудования и проведение ТОиР. В первом приближении можно считать, что эти затраты прямо пропорциональны количеству информации, и поэтому количественную оценку вероятности безотказной работы, коэффициента технического использования и других характеристик надёжности можно выразить через затраты на ТОиР в виде (рис. 2.8).

Поэтому необходимо искать эффективный уровень эксплуатационной надёжности, при котором достигается минимум суммарных затрат на ТОиР и потерь производства.

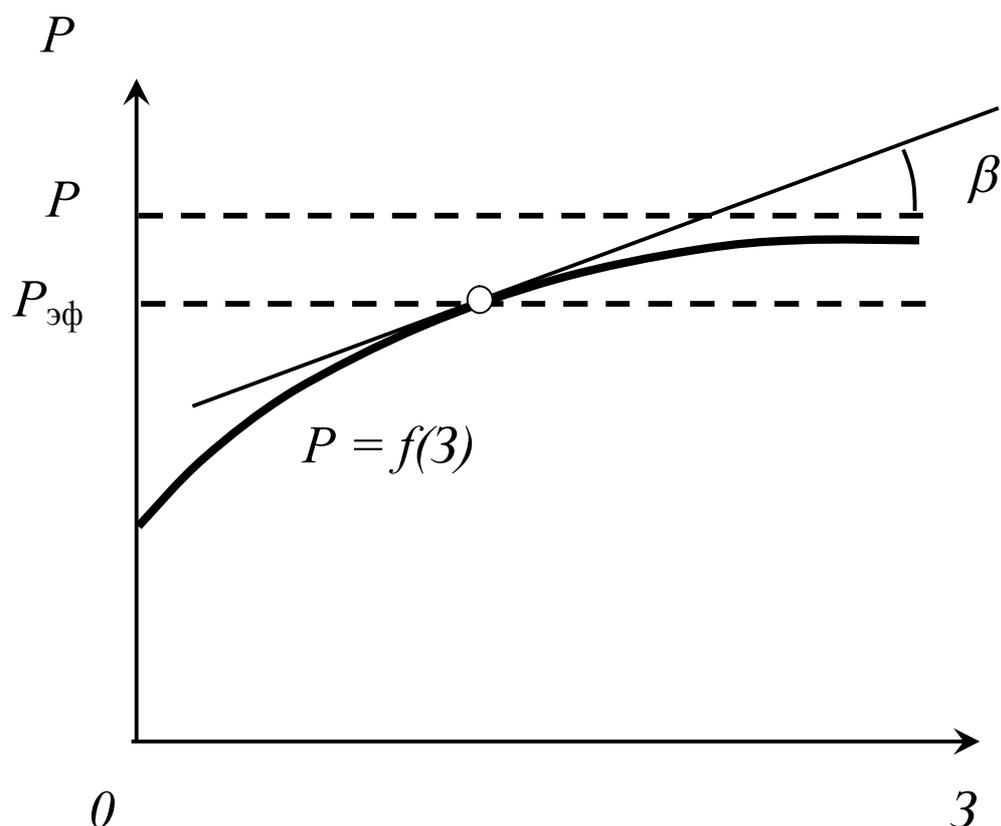


Рис. 2.8. Изменение эксплуатационной надёжности  $P$  оборудования в зависимости от затрат  $Z$  на его ТОиР

В качестве критерия минимального значения эффективности функционирования оборудования можно принять резкое уменьшение функции  $P = f(Z)$  в интервале  $\beta < 18^\circ$ . Если принять  $\text{tg } \beta = 0,3$ , то величину максимальных затрат на ТОиР можно найти из выражения

$$Z_{\max} = Z_0 \cdot \ln\left(\frac{P_0 \cdot B_0}{0,3 \cdot Z_0}\right)$$

Дальнейший рост затрат приведет к снижению эффективности функционирования оборудования, и поэтому его дальнейшая эксплуатация нецелесообразна, следовательно надо либо повышать базовую надёжность путём модернизации, либо заменой новым.

## **3. КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ МАШИН**

### **3.1. Причины нарушения работоспособности машин**

#### **3.1.1. Виды повреждений при силовом воздействии**

В процессе эксплуатации технологические машины и оборудование подвергаются различным воздействиям (силовое нагружение, изнашивание, температура, коррозионная среда и др.), что с течением времени приводит к накоплению необратимых изменений, которые обуславливают физическое старение деталей машин. Поэтому, потеря работоспособности оборудования при его эксплуатации – это неизбежный процесс, который протекает с большей или меньшей интенсивностью в зависимости от конструктивных особенностей, технологии изготовления и системы эксплуатации и ремонта.

Основными последствиями силового воздействия на оборудование являются деформации (упругие и пластические) и разрушения (поверхностные и объёмные) деталей машин и элементов конструкций.

*Упругие деформации.* При проектировании деталей машин используют конструкционные материалы, работающие в упругой области, причем расчёт обычно проводят по условиям прочности. Однако в условиях эксплуатации недостаточная жёсткость отдельных элементов может привести к нарушению нормальной работы конструкции и развитию опасных повреждений (отказов) сопряжённых элементов. Типичными примерами могут служить:

1) недостаточная жёсткость корпусных деталей, которая приводит к нарушению взаимодействия входящих в оборудование механизмов и узлов, утечкам рабочих жидкостей, изменению условий трения и др.;

2) большие прогибы валов, которые вызывают изменение относительного положения установленных на них деталей, что может привести, например, к появлению вибраций, заклиниванию подшипников

качения, ухудшению работы подшипников скольжения, развитию повреждений от фреттинг-коррозии и др.;

3) деформации кручения валов, которые приводят к различию углов закручивания трансмиссионных валов, что может привести, например, к перекосу моста крана и повышенному износу реборд ходовых колёс.

Как правило, эти недостатки являются следствием ошибок, допущенных при разработке конструкции оборудования. Для их устранения осуществляют работы по модернизации, в частности, корпусные детали снабжают дополнительными рёбрами жёсткости, валы размещают на самоустанавливающимися подшипниковых опорах и др.

*Пластические деформации.* Они возникают при перегрузке деталей, изготовленных из пластичных материалов, когда в детали под действием внешних сил возникают напряжения, превышающие предел текучести материала. При этом происходит изменения геометрических размеров и формы деталей (искривление валов и осей, вытяжка болтов, смятие шпонок, выдавливание ямок на дорожках качения подшипников, осадка пружин и др.), которые приводят к нарушению их работоспособности.

Остаточные деформации являются следствием увеличения действующих нагрузок выше допустимых значений, длительного действия переменных контактных напряжений и повышенных температур. Они возникают при ударном приложении сил, при заклинивании механизмов, при нарушении правил технической эксплуатации.

Для их предотвращения можно предложить следующие меры: обучение эксплуатационного персонала и повышение требований за соблюдением правил технической эксплуатации (ПТЭ) оборудования, применение материала с повышенными механическими характеристиками, повышение твёрдости поверхностного слоя, изменение конструкции детали или узла.

*Объёмные разрушения от статических нагрузок.* Под статическими нагрузками понимают однократные или медленно повторяющиеся нагрузки, когда усталостное разрушение не успевает развиваться. Различают два

основных вида объёмного разрушения: вязкое (вязкий излом) и хрупкое (хрупкий излом).

Вязкий излом – это разрушение детали, которому предшествует значительная пластическая деформация. Чаще всего он возникает под действием нагрузок, превышающих допустимые значения и являющихся следствием нарушения правил ПТЭ.

Хрупкий излом – это разрушение детали, которому не предшествует пластическая деформация. Он является следствием значительных ударных нагрузок, длительного воздействия знакопеременной нагрузки, низкого качества материала (например, сталь с повышенным содержанием P, S) или его термообработки, наличия концентраторов напряжений.

Для их предотвращения используются те же меры, что и в случае пластических деформаций. Для устранения хрупкого излома можно также рекомендовать исключение поверхностных концентраторов напряжений.

*Объёмные разрушения от переменных нагрузок.* Под переменными нагрузками понимают изменяющиеся во времени с определенной частотой нагрузки, которые в конечном итоге приводят к специфическому виду излома, который называется усталостным.

Усталостный излом – это разрушение детали в результате действия переменных напряжений, превышающих предел выносливости материала, из которого она изготовлена. Усталостное разрушение может произойти вследствие различных причин: конструкционных (неправильная оценка усталостной прочности при проектировании), технологических (наличие дефектов изготовления) и эксплуатационных (увеличение действующих нагрузок, появление концентраторов напряжений).

На усталостную прочность оказывают влияние три основных фактора: концентраторы напряжений, абсолютные размеры детали (масштабный фактор) и состояние поверхностных слоёв детали.

Поэтому конструктивные меры повышения усталостной прочности направлены, в основном, на снижение концентрации напряжений и

номинальных величин переменных напряжений: разработка формы детали с минимальным количеством концентраторов напряжений и их перенос в наименее нагруженные зоны, применение благоприятных форм сопряжений ступеней, рациональная расстановка опор и др.

Основными технологическими мерами повышения усталостной прочности являются: применение термической или химико-термической обработки, повышение класса чистоты обработки поверхности, упрочнение методами поверхностного пластического деформирования, применение покрытий, наплавки и напыления.

К эксплуатационным мерам повышения усталостной прочности можно отнести повышение требований за соблюдением правил технической эксплуатации оборудования, исключение длительной работы оборудования с повышенными нагрузками, предохранение напряженных и ответственных деталей от наружных повреждений, снижение динамических нагрузок.

### **3.1.2. Виды повреждений при изнашивании**

В процессе эксплуатации оборудования в узлах трения развиваются процессы изнашивания, в результате чего происходит непрерывное изменение геометрии, структуры и состояния контактирующих поверхностей. В зависимости от происходящих физико-химических явлений выделяют следующие виды изнашивания: механическое (абразивное, усталостное), молекулярно-механическое (адгезионное, избирательный перенос), коррозионно-механическое (окислительное, фреттинг-коррозия).

*Абразивное изнашивание.* Оно является следствием разрушения поверхностей деталей в результате воздействия на них абразивных частиц, содержащихся в зоне трения. При абразивном изнашивании износостойкость зависит от соотношения твёрдостей абразива  $H_{абр}$  и металла  $H_{мет}$ . Если при  $H_{мет} < (0,6...0,8) \cdot H_{абр}$ , то износостойкость не зависит от разности твёрдостей. Если  $H_{мет} = (0,8...1,5) \cdot H_{абр}$ , то интенсивность износа снижается с

увеличением твёрдости металла. Износостойкость существенно повышается при  $H_{\text{мет}} > 1,5 \cdot H_{\text{абр}}$ .

Эрозионный износ является результатом механического ударного воздействия на поверхность детали жидких и твёрдых частиц, движущихся с большой скоростью и обладающих большим запасом энергии. Эрозия возможна также при воздействии волн кавитационного происхождения. Кавитационный износ – хрупкое разрушение поверхностей деталей в результате гидравлических ударов, характерных для деталей гидравлических систем. В потоке жидкости образуются пузырьки пара или газа, которые при переходе в область более высоких давлений конденсируются и тем самым создают условия для местного гидравлического удара.

Для повышения износостойкости узлов трения в условиях абразивного изнашивания необходимо применение сталей, подвергнутых упрочняющей поверхностной обработке или высокотвёрдых сплавов.

*Усталостное изнашивание.* Под действием переменных контактных напряжений в деталях машин возникают усталостные разрушения, которые являются результатом интенсивного изнашивания поверхностных слоёв металла. Усталостное изнашивание проявляется при трении качения в виде местных очагов разрушения (питтинг) и при трении скольжения в отделении микрообъёмов поверхности.

Повышение износостойкости в условиях усталостного изнашивания достигается снижением контактных напряжений, применением материалов с повышенным сопротивлением усталости, повышением класса чистоты поверхностной обработки, использованием жидких смазочных материалов с высокой степенью очистки.

*Адгезионное изнашивание.* При трении металлических поверхностей вследствие адгезионной связи (схватывания) происходит вырывание частиц металла, часть которых налипает на сопряжённую поверхность. При этом различают два процесса схватывания, отличающиеся характером разрушения (изнашивания). Схватывание I рода наблюдается при малых скоростях

скольжения и высоких контактных нагрузках, и сопровождается образованием на поверхностях трения углублений и наростов со значительным изменением шероховатости. Схватывание II рода происходит при высоких скоростях скольжения и средних контактных нагрузках, вызывающих интенсивный рост температуры в поверхностных слоях, что приводит к образованию грубой поверхности в отчётливыми следами течения и размазывания металла вдоль движения поверхности трения.

Для предотвращения схватывания применяют поверхностное пластическое деформирование, поверхностную закалку, сульфидирование и введение в смазочный материал присадок, содержащих *S*, *Cl*, *P*.

*Окислительное изнашивание.* Оно характеризуется постепенным разрушением поверхностей при нормальных или повышенных температурах при трении с недостаточным количеством смазочного материала и при больших скоростях скольжения.

Повышение износостойкости достигается путём повышения поверхностной твёрдости сопряжённых деталей методами поверхностного пластического деформирования термической или химико-термической обработки и др.

*Фреттинг-коррозия.* Этот вид изнашивания проявляется в подвижных и неподвижных соединениях при колебаниях контактирующих поверхностей с очень малыми амплитудами. Наиболее интенсивное изнашивание наблюдается при амплитудах от 0,1 до 0,15 мм. Повреждения поверхностей вследствие фреттинг-коррозии являются концентраторами напряжений и снижают предел выносливости детали. Необходимое условие возникновения фреттинг-коррозии – наличие проскальзывания между сопряжёнными поверхностями.

Предотвратить или замедлить развитие процесса фреттинг-коррозии можно путём повышения твёрдости одной из деталей, увеличения натяга соединения, нанесения на поверхность контакта различных покрытий, применения для смазки масла с противоизносными присадками.

### 3.1.3. Виды повреждений при температурном воздействии

К основным последствиям температурных воздействий можно отнести: температурные силы и напряжения, температурные деформации, изменение механических свойств материала, разрушение от термической усталости, ползучесть и релаксация.

*Температурные силы, напряжения и деформации.* В результате температурных воздействий в деталях машин и элементах конструкций, соединении которых препятствует их свободному тепловому расширению, возникают температурные силы и напряжения. Их величины, зависящие от температуры нагрева, температурного коэффициента расширения и жёсткости соединяемых элементов, могут достигать достаточно больших значений, и привести к появлению пластических деформаций и даже к разрушению. С изменением температуры изменяются линейные размеры деталей машин и элементов конструкций, что может привести к нарушению нормального функционирования узлов и механизмов вследствие изменения взаимного расположения и формы поверхностей, зазоров, посадок, межосевых расстояний и т.п.

Для исключения таких повреждений в конструкциях предусматривают компенсаторы теплового расширения, предотвращающие нарушение работоспособности конструкции. Следует также избегать осевой фиксации в двух точках нагреваемой детали (вал, балка, рама и др.), для чего одна из опор закрепляется жёстко, а другая является «плавающей», т.е. имеет возможность осевого перемещения. Уменьшение температурных усилий, напряжений и деформаций можно достигнуть путём выбора рациональной формы деталей, условий их соединения и охлаждения.

*Изменение механических свойств материала.* Для большинства конструкционных материалов температурные воздействия приводят к изменению теплофизических и механических свойств, что необходимо учитывать при разработке конструкции оборудования и его эксплуатации.

Уменьшить влияние этого фактора можно применением жаропрочных окалиностойких материалов.

*Разрушение от термической усталости.* Наиболее распространенным видом термических повреждений металлургического оборудования является термическая усталость как результат одновременно действующих механических нагрузок и циклических температур с большим перепадом (800°C и более). Разрушения из-за термической усталости возникают при длительном воздействии изменяющихся температурных напряжений. Этому виду повреждения подвержены рабочие валки и ролики рольгангов станов горячей прокатки, ролики МНЛЗ, ножи для резки горячего металла и др. Характерным признаком термической усталости является так называемая «сетка разгара».

Для предотвращения этого вида повреждения рекомендуется применять стали с повышенным сопротивлением термической усталости – 60С2, 30ХГСА, Х18Н9Т и др.

*Ползучесть и релаксация.* Ползучестью называется процесс медленного непрерывного нарастания во времени пластической деформации материала при длительном статическом нагружении. В результате ползучести деформации могут достигать предельных величин, при которых нарушается нормальная работа оборудования вследствие изменения размеров и формы деталей и условий их соединения (натягов и зазоров). При очень больших пластических деформациях может произойти даже разрушение деталей. Для сталей и чугунов ползучесть существенна лишь при повышенной температуре (свыше 300°C) и протекает тем интенсивнее, чем выше температура.

Ползучесть сопровождается релаксацией напряжений, что приводит к уменьшению величины напряжений и перераспределению их по объёму детали. В результате релаксации напряжений снижается усилие затяжки в стяжных болтах и усилия, развиваемые пружинами.

### 3.1.4. Виды повреждений при коррозии

Коррозия металлов – процесс разрушения металлов при их химическом или электрохимическом взаимодействии с внешней (коррозионной) средой. Коррозию классифицируют: по характеру взаимодействия металла со средой – химическая, протекающая в среде, не проводящей электрический ток, и электрохимическая (в водных растворах электролитов); по типу коррозионной среды – атмосферная, газовая, жидкостная; по виду коррозионных разрушений – сплошная, местная, подповерхностная, межкристаллитная, щелевая и др.

*Атмосферная коррозия.* Она является самым распространенным видом коррозии машин и оборудования, работающих на открытом воздухе, и возникает при влажности среды более 70% за счет конденсации влаги и взаимодействия с кислородом воздуха. Скорость атмосферной коррозии зависит от относительной влажности среды, наличия агрессивных компонентов, состояния поверхности детали, химического состава и структуры металла и других факторов. Предотвратить атмосферную коррозию можно применением материалов с повышенными антикоррозионными свойствами, применением защитных покрытий, пассивацией поверхности.

*Газовая коррозия.* Она протекает под воздействием нагретых до 300...600°C агрессивных газов, образующихся при осуществлении различных технологических процессов. При температуре выше 600°C наблюдается резкая интенсификация процесса окалинообразования. Для её предотвращения используются те же меры, что и в случае атмосферной коррозии, а также применяют материалы с повышенной окалиностойкостью.

*Жидкостная коррозия.* Она обусловлена наличием в среде солей, щелочей и кислот, водные растворы которых представляют собой электролит. Электрохимическая коррозия развивается в водной среде с растворенным кислородом за счёт электрохимических процессов, связанных

с неоднородностью металла, в поверхностных трещинах, в щелях. Основными мерами по устранению жидкостной коррозии являются: ограничение или предотвращение доступа кислорода к поверхности металла, применение коррозионно-стойких материалов, исключение условий возникновения электрохимических процессов.

*Коррозионное растрескивание.* Оно возникает при одновременном действии статических нагрузок и агрессивной (по отношению к данному металлу) коррозионной среды. Коррозионное растрескивание является одним из наиболее опасных видов коррозионного разрушения, так как оно протекает при отсутствии видимых повреждений на поверхности металла или образования продуктов коррозии. Оно является следствием пониженной коррозионной стойкости границ зерен и их наводораживания, что ведёт к снижению межкристаллитной прочности и последующему внезапному хрупкому разрушению детали, напряжения в которой не превышают допустимые значения. Предотвратить коррозионное растрескивание можно заменой материала и исключением возможности наводораживания.

*Коррозионная усталость.* Разрушения из-за коррозионной усталости возникают в результате совместного действия переменных напряжений и коррозионно-активной среды. Основными факторами, которые её вызывают, являются активность коррозионной среды, уровень действующих циклических напряжений, число циклов нагружения, усталостная прочность и коррозионная стойкость металла детали. Предотвращается коррозионная усталость защитой деталей от коррозионной среды и применением низколегированных марок сталей.

### **3.1.5. Меры по повышению долговечности машин**

Меры по повышению эксплуатационных свойств деталей машин и оборудования для различных видов повреждений при внешнем воздействии нагрузок, трения, температуры и коррозии приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Меры по повышению эксплуатационных свойств деталей машин и оборудования для различных воздействий

Меры по повышению эксплуатационных свойств	Виды повреждений при внешнем воздействии																			
	нагрузок						трения						температуры				коррозии			
	Разрушения от статической нагрузки	Остаточные деформации	Усталостные разрушения	Хрупкое разрушение	Малоцикловая усталость	Упругие деформации	Абразивное изнашивание	Усталостное изнашивание	Фреттинг-коррозия	Схватывание 1-го рода	Схватывание 2-го рода	Адгезионное изнашивание	Термическая усталость	Жаропрочность	Ползучесть	Окалиностойкость	Коррозия	Коррозионная усталость	Коррозионное растрескивание	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
<b>Конструкционные методы</b>																				
<i>Изменение конструкции</i>																				
Уменьшение нагрузок																				
Устранение концентраторов																				
Уменьшение давления																				
Увеличение давления																				
Уменьшение скорости скольжения																				
Увеличение жёсткости																				
Уменьшение жёсткости																				

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>Улучшение материала</i>																			
Увеличение временного сопротивления разрыву																			
Увеличение предела текучести																			
Повышение пластичности																			
Повышение ударной вязкости																			
Повышение теплопроводности																			
Повышение твёрдости																			
Применение легированных сталей																			
<b>Технологические методы</b>																			
<i>Улучшение механической обработки</i>																			
Чистовое точение, фрезерование																			
Шлифование																			
<i>Поверхностная пластическая деформация (наклён)</i>																			
Дробеструйная обработка																			
Накатка роликами, шариками																			
Чеканка																			
Выглаживание																			
Дорнование																			

Окончание таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>Термическая обработка</i>																			
Отжиг																			
Объемная и поверхностная закалка																			
<i>Химико-термическая обработка</i>																			
Цементация, нитроцементация																			
Азотирование, цианирование																			
Борирование																			
<i>Наплавка, напыление</i>																			
Наплавка																			
Напыление																			
<i>Гальваническое нанесение покрытий</i>																			
Хромирование																			
Никелирование, цинкование																			
Оксидирование																			
Осталивание																			
Фосфатирование																			
<i>Неметаллические покрытия</i>																			
Покрытие полимерами																			
Гуммирование																			
Лакокрасочные покрытия																			

## 3.2. Масса и металлоёмкость конструкции

### 3.2.1. Показатели удельной массы и металлоёмкости

В машиностроении, особенно в тяжёлом, уменьшение массы машин означает снижение расхода металла и стоимости изготовления.

Наибольшие возможности экономии металла заложены в снижении массы изделий массового выпуска, но это не освобождает от необходимости добиваться снижения массы машин единичного и малого выпуска, поскольку суммарный их выпуск составляет значительную долю всей машиностроительной продукции.

Уменьшение массы конструкции не является безусловной самоцелью. Расходы на материал составляют в общем небольшую часть стоимости машин и очень мало влияют на экономический эффект за все время эксплуатации машины, который зависит главным образом от надёжности машины. Если уменьшение массы сопряжено с опасностью уменьшения надёжности машины, то целесообразно, особенно в тяжёлом машиностроении, сдерживать тенденцию к снижению массы. Лучше иметь несколько более тяжёлую машину, но надёжную.

Сравнительные качества машин одинакового назначения оценивают *показателем удельной массы  $\mu_{\Pi}$* , представляющей собой частное от деления массы  $m$  машины на основной параметр машины  $\Pi$ .

Для машин-генераторов основным показателем является генерируемая мощность  $P$ , и поэтому удельная масса будет равна

$$\mu_{\Pi} = m/P, \text{ кг/кВт.}$$

Этот показатель отражает степень конструктивного совершенства машины, а также степень применения легких сплавов и неметаллических материалов.

У двигателей внутреннего сгорания удельная масса  $\mu_{\Pi}$  имеет

следующую величину: для стационарных 10...20, судовых 4...10, автомобильных 2,5...9,5, авиационных 0,7...1,0 кг/кВт.

В транспортном машиностроении для характеристики качества конструкции применяют отношение массы конструкции к полезному грузу. Этот показатель для судового транспорта равен 20...30, железнодорожного 10...20, автотранспорта 3...5 и для самолетов 1,2...2,5.

Совершенство конструкции редукторов характеризуют отношением их массы к передаваемому крутящему моменту

$$\mu_{\Pi} = m/T, \text{ кг}/(\text{Н}\cdot\text{м}).$$

От понятия «масса» следует отличать понятие *металлоёмкости*. Пусть две машины одинаковых размеров и с одинаковыми параметрами изготовлены: одна из чёрных металлов (стали и чугуна), а другая – из легких сплавов (алюминиевых). Очевидно, что масса второй машины меньше массы первой приблизительно во столько раз, во сколько раз плотность тяжёлых материалов больше плотности лёгких (в данном случае приблизительно в 2 раза). *Металлоёмкость*, рассматриваемая как количество вложенного в машину металла, у них одинаковая.

*Металлоёмкость* обычно связывают с объёмом металлических деталей, составляющих машину. Тогда наряду с удельной массой следует ввести показатель *удельной металлоёмкости*, как частное от деления объёма металлических деталей на основной параметр машины. Удельная металлоёмкость более правильно, чем удельная масса, характеризует качество конструкции, т. е. рациональность её схемы и совершенство форм деталей, независимо от плотности использованных материалов.

Машины обычно изготавливают из металлов с различной плотностью, поэтому в общем случае показатель удельной металлоёмкости имеет вид

$$\nu = \frac{V}{\Pi} = \frac{\frac{\Sigma m_1}{\rho_1} + \frac{\Sigma m_2}{\rho_2} + \dots}{\Pi},$$

где  $\Sigma m_1, \Sigma m_2, \dots$  – суммарные массы деталей, изготовленных соответственно из материалов плотностью  $\rho_1, \rho_2, \dots$ ;  $V$  – суммарный объём деталей машины;  $P$  – основной параметр машины.

Обратную величину  $P/V$  можно назвать коэффициентом использования объёма.

Уменьшения массы с параллельным снижением металлоёмкости добиваются приданием деталям рациональных сечений и форм, целесообразным использованием прочности материалов, применением прочных материалов, рациональных конструктивных схем, устранением излишних запасов прочности, заменой металлов неметаллическими материалами.

### **3.2.2. Рациональные сечения**

Максимального снижения массы можно добиться приданием деталям равнопрочности. Идеальный случай, когда напряжения в каждом сечении детали по её продольной оси и в каждой точке этого сечения одинаковые, возможен только при некоторых видах нагружения, когда нагрузку воспринимает всё сечение детали (растяжение-сжатие, отчасти сдвиг) и когда отсутствуют значимые концентраторы напряжений.

При изгибе, кручении и сложных напряжённых состояниях напряжения по сечению детали распределяются неравномерно. Они максимальны в крайних точках сечения, а в других точках могут снижаться до нуля, например, на нейтральной оси сечения детали, подвергаемой изгибу. В этих случаях можно только приблизиться к условию полной равнопрочности путём выравнивания напряжений по сечению. Этого можно достичь за счёт удаления металла из наименее напряжённых участков сечения и прибавления его в наиболее напряженных местах – на периферии сечения.

В качестве примера рассмотрим цилиндрическую деталь, подвергаемую изгибу или кручению (рис. 3.1). Напряжения в массивной

детали круглого сечения (нормальные напряжения при изгибе или касательные напряжения при кручении) распределяются по закону прямой линии, проходящей через центр сечения.

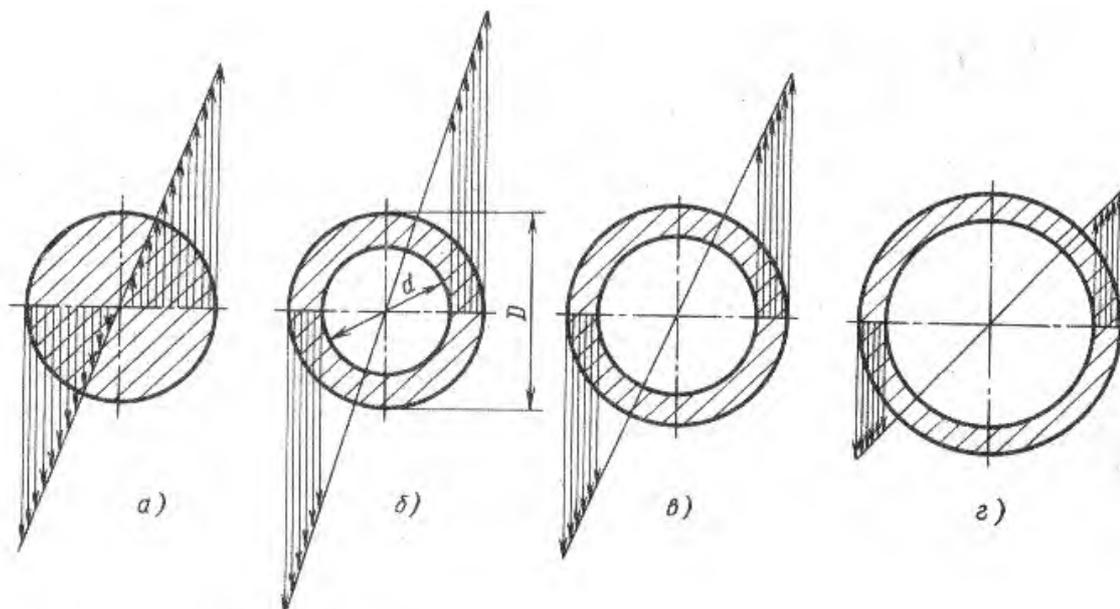


Рис. 3.1. Напряжения изгиба и кручения в сечениях цилиндрических деталей

Из рис. 3.1, а видно, что в центральной части сечения напряжения практически отсутствуют. Удаление слабо нагруженного металла из центра сечения путём придания сечению кольцевой формы обеспечивает более равномерное распределение напряжений в остающихся участках (рис. 3.1, б). Чем тоньше стенка кольца, т.е. чем больше отношение  $d/D$ , тем равномернее распределение напряжений. При сохранении постоянного наружного диаметра уровень напряжений в стенках, естественно, повышается. Однако небольшим увеличением наружного диаметра легко привести напряжения к прежнему уровню (рис. 3.1, в) и даже значительно их снизить (рис. 3.1, з).

### 3.2.3. Удаление металла из мало напряжённых участков

Облегчение деталей можно добиться удалением металла из явно мало напряжённых участков, находящихся в стороне от силового потока.

Шестерни 1 типа дисков (рис. 3.2, а) целесообразно облегчать глухими выборками 2 (рис. 3.2, б) или выборками с отверстиями (рис. 3.2, в). В последнем случае отверстия служат не только для облегчения детали, но и для удобства транспортировки. Снижение массы может достигать 50%.

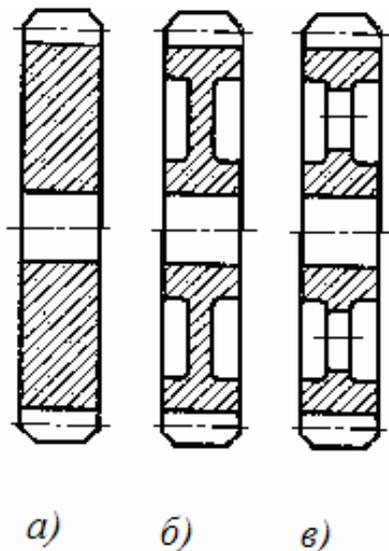


Рис. 3.2. Облегчение дисковой шестерни (а) за счёт удаления металла глухими (б) и сквозными (в) выборками

Фланцевые валы (рис. 3.3, а) облегчают удалением излишнего материала под центрирующими буртиками и буртиками для фиксации головок болтов (рис. 3.3, б), а также применением радиусного сопряжения фланца с валом (рис. 3.3, в). Уменьшение массы сопряжения в последнем случае составляет примерно 20%.

Значительного уменьшения массы можно достичь изменением круглой формы фланца на многоугольную (рис. 3.4, а) или форму с выкружками (рис. 3.4, б). Выигрыш в массе зависит от числа болтов. В рассматриваемом случае (шесть болтов) он очень велик. Масса болтового пояса фланца б уменьшается примерно на 30%, а фланца 7 - на 40 % по сравнению с круглым фланцем.

Последовательные этапы облегчения консольного вала шестерни показаны на (рис. 3.5).

Коническое зубчатое колесо (рис. 3.6, а) можно облегчить удалением материала ступицы на меньшем диаметре (рис. 3.6, б), поскольку

соответствующие зубья мало участвуют в передаче сил вследствие пониженной их жёсткости.

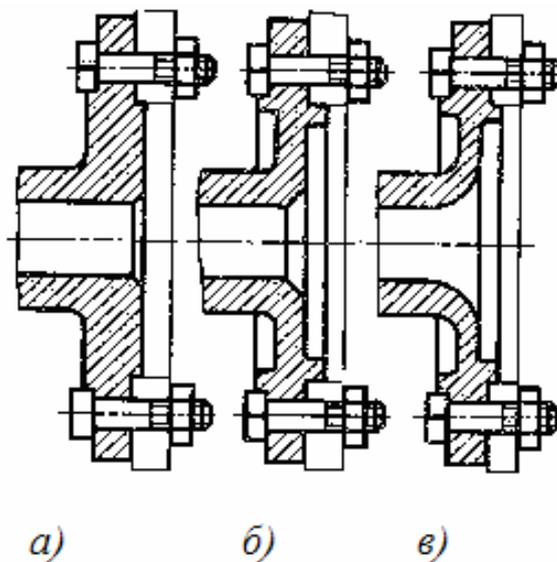


Рис. 3.3. Облегчение фланцевых валов (а) за счёт удаления под буртиками (б), и применением радиусного сопряжения (в)

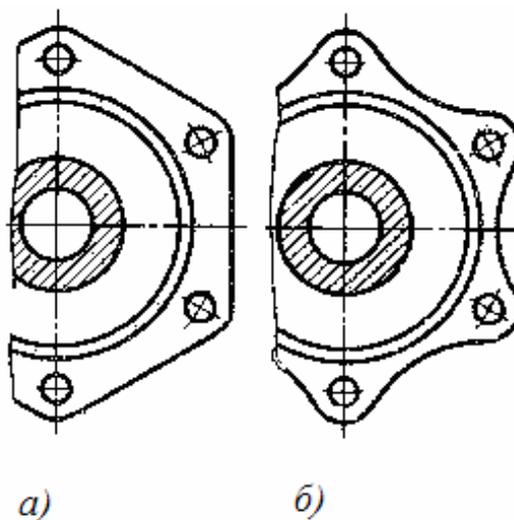


Рис. 3.4. Облегчение фланцев за счёт изменения круглой формы на многоугольную (а) или форму с выкружками (б)

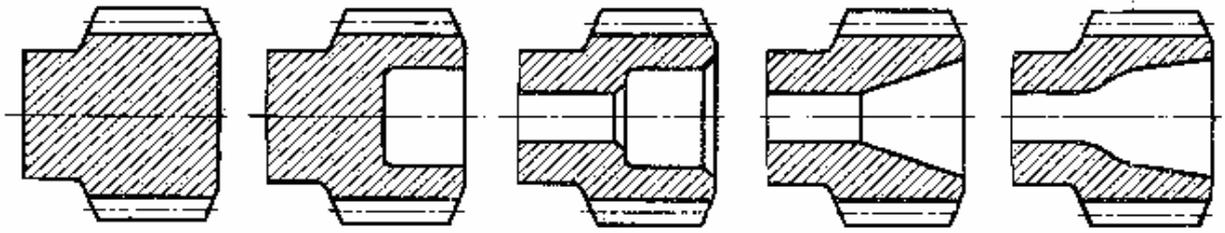


Рис. 3.5. Последовательные этапы облегчения консольного вала шестерни

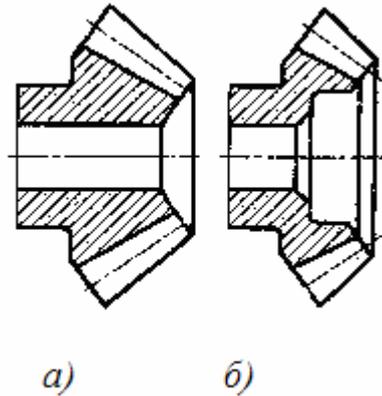


Рис. 3.6. Облегчение конического зубчатого колеса (а) путём удаления материала ступицы на меньшем диаметре (б)

Кроме выигрыша в массе, укорочение зубьев способствует более равномерному распределению нагрузки по длине зуба и уменьшению действующей на зубья силы вследствие увеличения среднего радиуса её приложения.

Детали типа кронштейнов (рис. 3.7, а), работающие на изгиб, можно облегчить удалением малонагруженного материала в центральной части корпуса кронштейна (рис. 3.7, б).

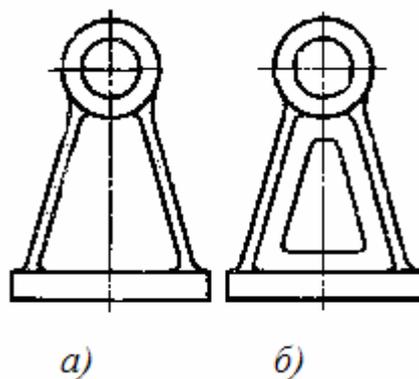


Рис. 3.7. Облегчение кронштейна (*а*) путём удаления материала из центральной части корпуса (*б*)

В поводковой муфте облегчение достигнуто изменением наружной конфигурации диска, в пазах которого перемещается поводок (рис. 3.8).

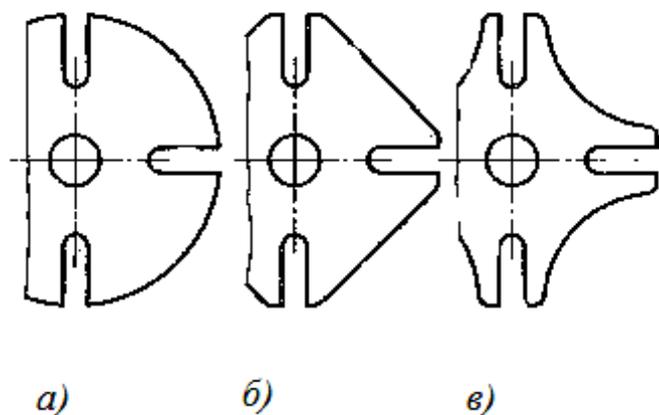


Рис. 3.8. Облегчение диска поводковой муфты за счёт изменения круглой формы (*а*) на многоугольную (*б*) или форму с выкружками (*в*)

Двухтавровый рычаг (рис. 3.9, *а*) можно облегчить удалением неработающих средних участков тавра (рис. 3.9, *б*) или приданием рычагу решётчатой формы (рис. 3.9, *в*).

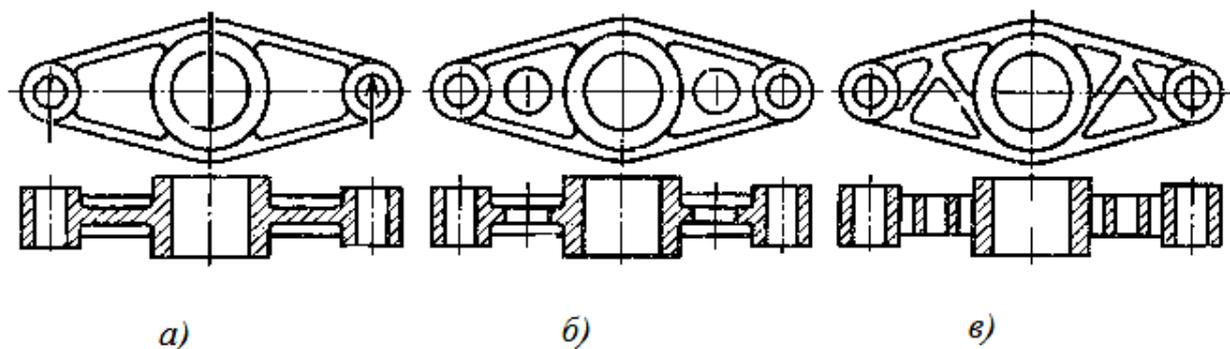


Рис. 3.9. Облегчение рычага (а) путём удаления средних участков (б) или придание рычагу решётчатой формы (в)

Не следует пренебрегать возможностями облегчения удалением лишнего металла даже на мелких деталях и на отдельных участках деталей. Несмотря на то, что выигрыш в массе в каждом таком частном случае невелик, но ввиду большого количества таких деталей в конструкции машины общий эффект довольно значителен.

При облегчении цилиндрических деталей типа дисков, крышек, колец, а также деталей с фигурными наружными очертаниями, например в виде многоугольников, наибольший эффект дает снятие материала с периферии и относительно меньший - на участках, близких к центру.

Сравним эффективность снижения массы при уменьшении размеров на различных диаметрах. На рис. 3.10, а приведён диск с ободом и ступицей. Определим выигрыш в массе при удалении участков металла одинаковой толщины  $b$  на ободе и ступице (на рисунке выделены чёрным цветом).

Объём металла, снимаемого с обода -  $V_1$ , со ступицы -  $V_2$ . Пусть толщина стенок обода и ступицы одинакова и  $D_1/D_2 = 0,8$ . При изображенных на рисунке соотношениях  $d_1/d_2 = 0,5$  отношение объёмов буде равно

$$\frac{V_1}{V_2} = 0,5 \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2.$$

При  $D_2/d_2 = 3$  отношение  $V_1/V_2 = 4,5$ . В частном случае, когда  $D_1/D_2 = d_1/d_2$  получаем  $V_1/V_2 = (D_2/d_2) = 9$ .

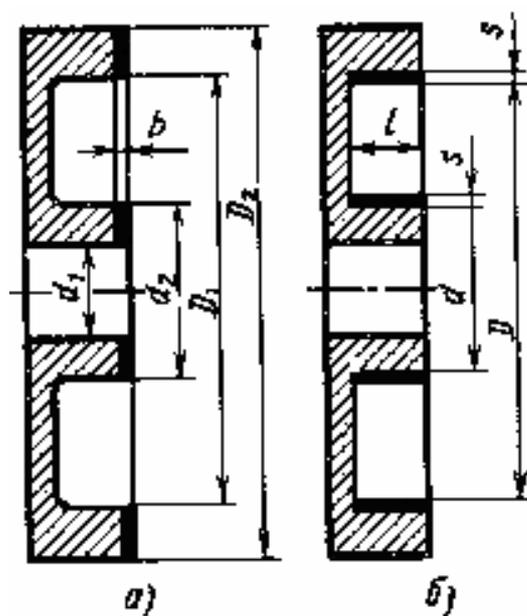


Рис. 3.10. Облегчение дисковых деталей путём удаления материала с торцевой поверхности (а) и цилиндрических поверхностей (б)

На рис. 3.10, б представлен случай уменьшения массы удалением кольцевых объёмов одинаковой толщины  $s$  с различных диаметров. В данном случае объём, снимаемый с обода, равен  $V_1 \approx \pi \cdot D \cdot s \cdot l$ , объём, снимаемый со ступицы -  $V_2 = \pi \cdot d \cdot s \cdot l$ , т.е. отношение  $V_1/V_2 = D/d$ , т.е. прямо пропорциональны отношению диаметров.

Способ уменьшения толщины по направлению к периферии широко применяют для облегчения деталей типа дисков, фланцев, крышек, тем более что эта форма часто соответствует закону изменения напряжений по радиусу (крышки, нагруженные осевой силой, приложенной в центре; фланцы, нагруженные крутящим или опрокидывающим моментом; вращающиеся диски, нагруженные центробежными силами).

Предпочтительность сокращения объёмов металла на больших диаметрах следует иметь в виду и при облегчении небольших деталей. Втулки целесообразно облегчать выборками не по внутреннему диаметру (рис. 3.11, а), а по наружному (рис. 3.11, б).

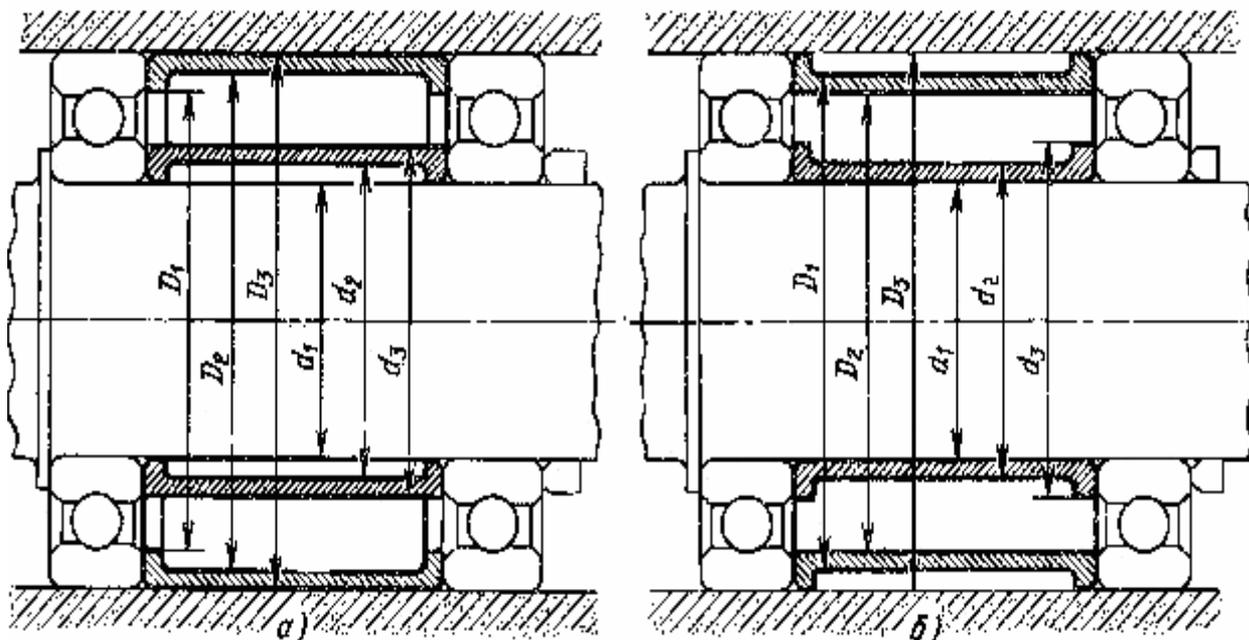


Рис. 3.11. Облегчение цилиндрических деталей по внутреннему (а) и наружному (б) диаметру

### 3.2.4. Влияние галтелей, скосов и конусов

Массу деталей можно снизить увеличением радиусов сопряжения стенок детали, т. е. приданием им более плавных очертаний (рис. 3.12).

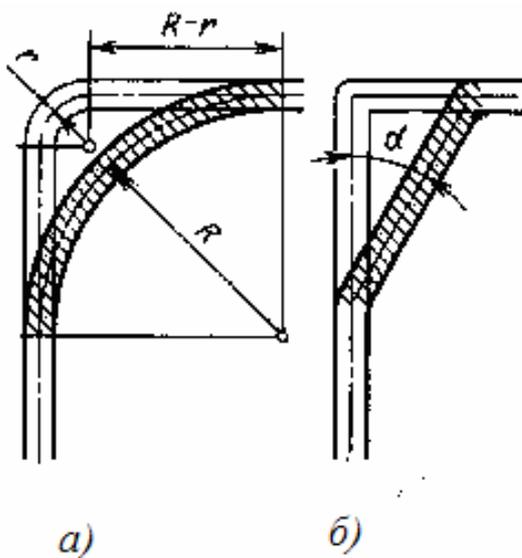


Рис. 3.12. Снижение массы сопряжений двух плоских стенок за счёт увеличения радиуса галтели (а) и введения скоса (б)

При сопряжении двух плоских стенок под углом  $90^\circ$  (рис. 3.12, а) выигрыш от увеличения радиуса галтели характеризуется соотношением

$$\frac{m}{m_0} = \frac{\pi}{4} \frac{1}{1 - \frac{r}{R} \left(1 - \frac{\pi}{4}\right)},$$

где  $r$  и  $R$  - соответственно исходный и увеличенный радиусы галтели;  $m$  и  $m_0$  - массы сопряжений при  $R$  и  $r$  соответственно.

По сравнению с сопряжением без галтели ( $r = 0$ ) -  $m/m_0 = \pi/4 = 0,785$ , т.е. выигрыш равен  $\sim 20\%$ .

При скосе стенок данного сопряжения (рис. 3.12, б) отношение массы  $m$  скошенного соединения к массе  $m_0$  соединения под прямым углом

$$\frac{m}{m_0} = \frac{1}{\sin \alpha + \cos \alpha}.$$

Это отношение имеет минимум при  $\alpha = 45^\circ$ , равный  $0,71$ . Таким образом, выигрыш в массе по сравнению с сопряжением под прямым углом составляет  $\sim 30\%$ .

Необходимо отметить, что речь идёт о сокращении только массы сопряжения. Выигрыш в массе всей детали, естественно, зависит от соотношения массы сопряжений и массы детали в целом.

Аналогично при сопряжении цилиндрических тел, состоящих из плоской стенки и обечайки, массу деталей снижают введением галтелей и скосов на участке сопряжения, а также заменой плоской стенки конусом.

Однако конусообразные формы не рекомендуются для деталей, вращающихся с большой частотой, так как в данном случае центробежные силы вызывают сложный пространственный изгиб конического диска, стремясь как бы придать ему плоскую форму.

### **3.2.5. Листовые штампованные конструкции**

Действенным средством уменьшения массы является применение листовых штампованных конструкций.

Детали в виде тел вращения изготавливают раскатыванием на токарных станках (в условиях единичного или мелкосерийного производства) или штамповкой (в крупносерийном производстве). В серийном производстве, когда масштаб выпуска оправдывает изготовление штампов, целесообразно переводить на листовую штамповку крупные детали (щитки, панели, кожухи, диафрагмы, обтекатели, облицовки и др.).

На рис. 3.13 показан пример замены литой крышки подшипникового узла (*а*) на крышку, выполненную из листовой стали (*б*). В результате масса крышки снижается в несколько раз. Однако при этом снижается её жёсткость, что необходимо учитывать при наличии осевых нагрузок.

Пониженную прочность и жёсткость тонколистовых конструкций компенсируют приданием пространственных или сводчатых форм, выдавливанием рельефов, отбортовкой, введением связей, приваркой профилей жёсткости.

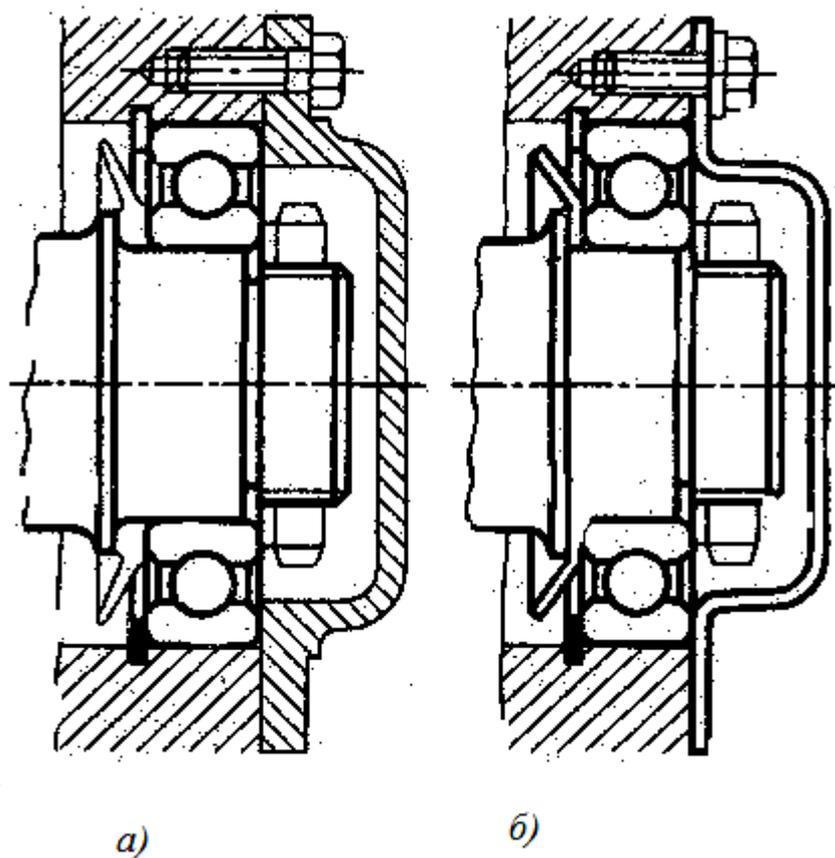


Рис. 3.13. Уменьшения массы заменой литых деталей (*а*) штампованными (*б*)

Детали из пластичных металлов (низкоуглеродистые стали, алюминиевые сплавы) при толщине листов не более 3-4 мм изготавливают холодной штамповкой, а детали из листов толщиной более 4 мм изготавливают горячей штамповкой.

### **3.2.6. Повышение прочностных характеристик материалов**

Эффективным средством снижения массы является повышение прочностных характеристик материалов. В отличие от способа увеличения напряжений путём снижения фактического запаса прочности, сопряжённого с риском ослабления детали, надёжность в данном, случае не уменьшается (если сохраняется запас прочности). Другое отличие заключается в том, что этот способ применим ко всем деталям без исключения, тогда как первый способ охватывает только расчётные детали.

Основные способы упрочнения материалов следующие: горячая обработка давлением, легирование, упрочняющая термическая и химико-термическая обработка, обработка методами холодной пластической деформации.

При *горячей обработке давлением* упрочнение происходит в результате превращения рыхлой структуры слитка в уплотнённую структуру с ориентированным направлением кристаллитов. Пустоты между кристаллитами уплотняются и завариваются, прослойки примесей по стыкам кристаллитов дробятся и под действием высокой температуры и давления растворяются в металле.

Наибольшее значение для прочности имеет процесс рекристаллизации, протекающий при остывании металла в определенном интервале температур (для сталей 450...700°C). Из обломков кристаллитов, разрушенных в процессе пластической деформации, возникают новые мелкие зёрна. При росте рекристаллизованных зёрен примеси остаются в

растворенном состоянии в кристаллитах. Для ковкого металла характерна структура, состоящая из мелких округлых зёрен, хорошо связанных друг с другом, что обуславливает его повышенную прочность и вязкость.

Кованым и особенно прокатанным металлам свойственна анизотропия механических свойств в направлениях вдоль и поперек волокон.

Направление волокон в кованных и штампованных деталях должно быть согласовано с конфигурацией деталей и направлением действия рабочих нагрузок. Кованые коленчатые валы (рис. 3.14, б) с волокнами, следующими контуру, значительно прочнее вала, изготовленного из сортового проката с перерезкой волокон (рис. 3.14, а).

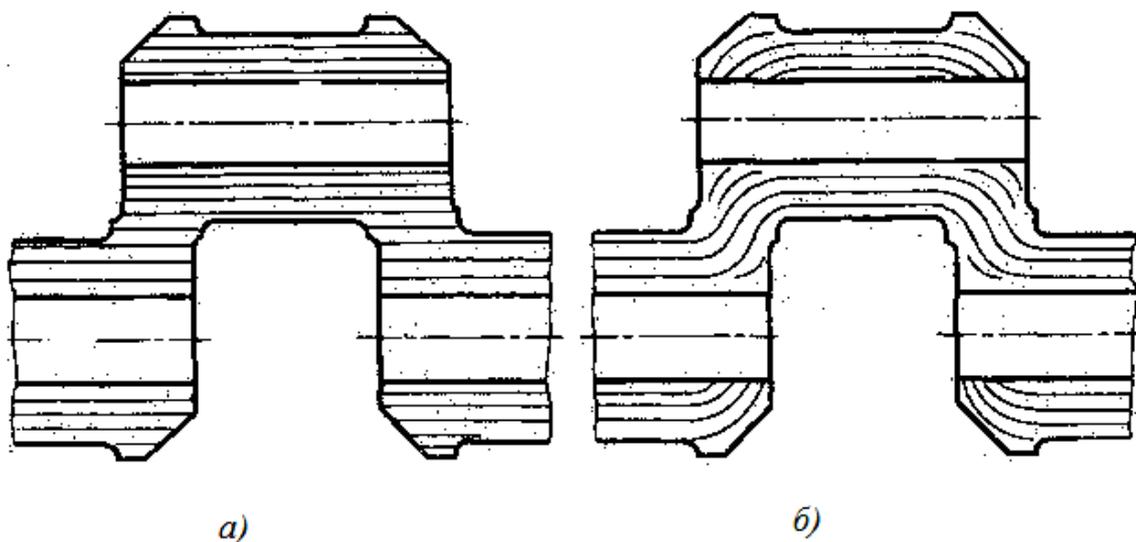


Рис. 3.14. Расположение волокон коленчатых валов, полученных из сортового проката механической обработкой (а) и горячей ковкой (б)

При традиционном способе нарезания зубьев шестерни происходит перерезывание волокон металла (рис. 3.15, а). Горячее накатывание зубьев шестерён, с последующим холодным калиброванием, обеспечивает правильное направление волокон относительно действующих на зуб нагрузок (рис. 3.15, б).

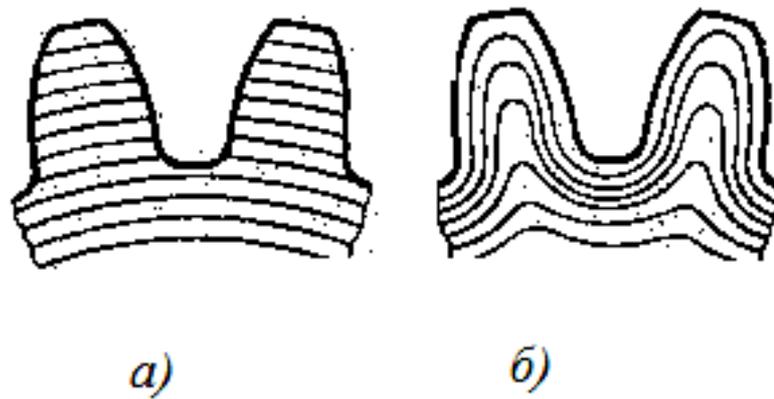


Рис. 3.15. Расположение волокон в зубьях шестерни, полученных механической обработкой (а) и горячей накаткой (б)

Повышенной прочностью обладает накатанная резьба (рис. 3.16) и другие фасонные детали.

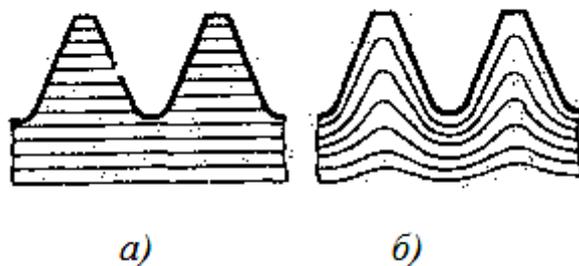


Рис. 3.16. Расположение волокон в резьбе, полученной механической обработкой (а) и горячей накаткой (б)

**Легирование** обеспечивает дифференцированное улучшение отдельных характеристик материала: вязкости, пластичности, упругости, жаропрочности, хладостойкости, сопротивления износу, коррозионной стойкости и др. Присадка некоторых элементов (никеля и особенно микроприсадка бора) увеличивает прокаливаемость сталей, что позволяет получать повышенные механические свойства по всему сечению детали. Для получения высоких механических качеств легирование должно быть дополнено термообработкой.

В табл. 3.2 приведены сравнительные (средние) характеристики легированных и углеродистых сталей.

Таблица 3.2

Механические характеристики углеродистых и легированных сталей при оптимальной термообработке

Стали	Предел прочности	Предел текучести	Относительное удлинение, %	Предел выносливости, МПа	Ударная вязкость, МДж/м <sup>2</sup>
	МПа				
НУС	350-500	250	25	150	0,3-0,6
СУС	600-800	400-500	12	250-300	0,4-0,8
ЛС	1000-1800	1000-1500	6-8	600-1000	0,6-1,0

**Упрочняющая термическая обработка** (закалка с высоким, средним и низким отпуском, изотермическая закалка) вызывает образование неравновесных структур с повышенной плотностью дислокаций и сильно деформированной атомно-кристаллической решёткой (сорбит, троостит, мартенсит, бейнит). Регулируя режимы термообработки, можно получать стали с различным содержанием этих структур, размерами и формой зёрен и соответственно с различными механическими свойствами. Для конструкционных сталей чаще всего применяют улучшение (закалка с высоким отпуском на сорбит), обеспечивающее наиболее благоприятное сочетание прочности, вязкости и пластичности.

Закалка с индукционным нагревом поверхностного слоя токами высокой частоты (ТВЧ) помимо технологических преимуществ (экономичность, высокая производительность) даёт значительный упрочняющий эффект, обусловленный возникновением в закалённом поверхностном слое остаточных напряжений сжатия.

Химико-термическая обработка заключается в насыщении поверхностного слоя углеродом (цементация) или азотом (азотирование) с

образованием (в последнем случае) нитридов железа и легирующих элементов. При комплексных процессах (цианирование, нитроцементация) поверхность насыщается одновременно углеродом и азотом с образованием карбидов и карбонитридов. Эти виды химико-термической обработки придают поверхности высокую твердость и износостойкость. Вместе с тем они увеличивают прочность (особенно в условиях циклической нагрузки) благодаря образованию в поверхностном слое напряжений сжатия.

Разновидностью химико-термической обработки является термодиффузионное поверхностное легирование (насыщение поверхностного слоя атомами легирующих элементов), которое применяют для повышения прочности и твердости, а также придания поверхности особых свойств (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Поверхностное диффузионное легирование

Процесс	Сущность процесса	Назначение
Диффузионное хромирование	Образование в поверхностном слое карбидов и $\alpha$ -твердых растворов Cr в железе	Повышение твердости (HV 1200-1500) и термостойкости
Титанирование	Образование в поверхностном слое $\alpha$ -твердых растворов Ti, карбидов титана TiC и интерметаллидов типа Fe <sub>2</sub> Ti	Повышение твердости (HV 1600-2000), повышение коррозионной и эрозионной стойкости
Бериллизация	Образование в поверхностном слое $\alpha$ -твердых растворов Be и бериллидов	Повышение твердости (HV 1100-1200), увеличение коррозионной стойкости
Борирование	Образование в поверхностном слое $\alpha$ -твердых растворов B и боридов Fe	Повышение твердости (HV 1100-1200) и термостойкости

Процесс	Сущность процесса	Назначение
Сульфидирование	Образование в поверхностном слое сульфидов Fe	Повышение износостойкости, придание противозадирных свойств, повышение стойкости против сваривания
Силицирование	Образование в поверхностном слое $\alpha$ -твердых растворов Si и силицидов	Повышение износостойкости, повышение горячей коррозионной стойкости
Селенирование	Образование в поверхностном слое $\alpha$ -твердых растворов Se и селенидов	Повышение износостойкости, придание противозадирных свойств
Алитирование	Отложение на поверхности кристаллической пленки $Al_2O_3$ , образование в поверхностном слое $\alpha$ -твердых растворов Al и алюминидов	Повышение горячей коррозионной стойкости

### 3.3. Прочность деталей, узлов и соединений

#### 3.3.1. Равнопрочность деталей

В случае кручения, изгиба и сложных напряжённых состояний, когда равенство напряжений по сечению принципиально недостижимо, условно равнопрочными, считают детали, у которых одинаковые максимальные напряжения в каждом сечении (с учетом концентрации напряжений).

При изгибе условие равнопрочности заключается в равенстве отношения рабочего изгибающего момента, действующего в каждом данном сечении, к моменту сопротивления данного сечения. При кручении это условие состоит в равенстве моментов сопротивления кручению каждого

сечения детали, при сложных напряжённых состояниях — в равенстве запасов прочности.

Понятие равнопрочности применимо и к нескольким деталям, и к конструкции в целом. Равнопрочными являются конструкции, детали которых имеют одинаковый запас прочности по отношению к действующим на них нагрузкам. Это правило распространяется, и на детали, выполненные из различных материалов. Так, равнопрочными являются стальная деталь с напряжением 200 МПа при пределе текучести  $\sigma_{0,2} = 600$  МПа и деталь из алюминиевого сплава с напряжением 100 МПа при  $\sigma_{0,2} = 300$  МПа. В обоих случаях коэффициент запаса прочности равен 3. Значит, обе детали одновременно придут в состояние пластической деформации при повышении действующих на них нагрузок в 3 раза. Независимо от этого каждая из сравниваемых деталей может еще обладать равнопрочностью в указанном выше смысле, т.е. иметь одинаковый уровень напряжений во всех сечениях.

Рабочие нагрузки и напряжения определяют расчётом. Деталь, рассчитанная как равнопрочная, будет действительно равнопрочной, если расчёт правильно определяет истинное распределение напряжений во всех её частях, что далеко не всегда имеет место.

Формы, требуемые условием равнопрочности, иногда трудно выполнить технологически, и их приходится упрощать. Неизбежные дополнительные элементы (цапфы, буртики, канавки, выточки, резьбы и др.), вызывающие иногда местное усиление, а чаще концентрацию напряжений и местное ослабление детали, также вносят поправки в истинное распределение напряжений в детали.

Конструирование равнопрочных деталей практически сводится к приближительному воспроизведению оптимальных форм, диктуемых условием равнопрочности, при всемерном уменьшении влияния всех источников концентрации напряжений.

Выигрыш в массе от применения принципа равнопрочности зависит от типа нагружения и способа придания равнопрочности. Следует иметь в виду,

что при прочих одинаковых условиях, жёсткость равнопрочных деталей меньше, чем жёсткость деталей, имеющих хотя бы местные повышенные запасы прочности.

В качестве примера рассмотрим консольную балку, нагруженную изгибающей силой  $F$  (рис. 3.17).

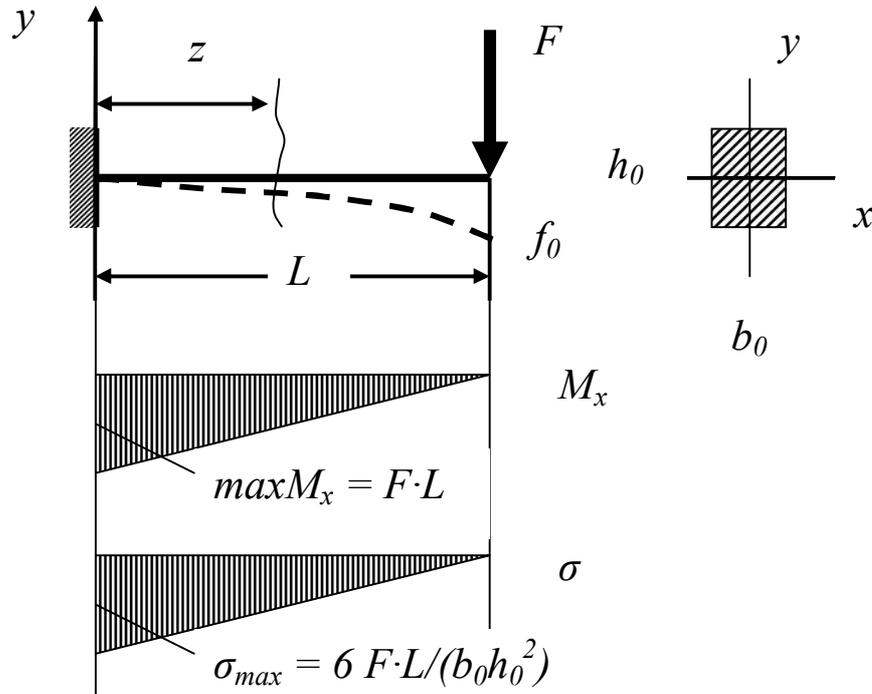


Рис. 3.17. Изгиб консольной балки постоянного сечения под действием сосредоточенной силы

Эпюра изгибающего момента имеет вид прямой линии с максимальным моментом в заделке, равным

$$M_{\max} = F \cdot L / 4.$$

Для балки постоянного поперечного сечения в виде прямоугольника момент сопротивления изгибу равен

$$W = b_0 \cdot (h_0)^2 / 6.$$

Поэтому нормальные напряжения по длине балки будут изменяться по линейному закону с максимальным значением в заделке

$$\sigma_{\max} = 6 \cdot F \cdot L / (b_0 \cdot h_0^2).$$

Обеспечить равенство напряжений (равнопрочность) по длине балки прямоугольного поперечного сечения можно изменением ширины (рис. 3.18) или высоты (рис. 3.19) балки.

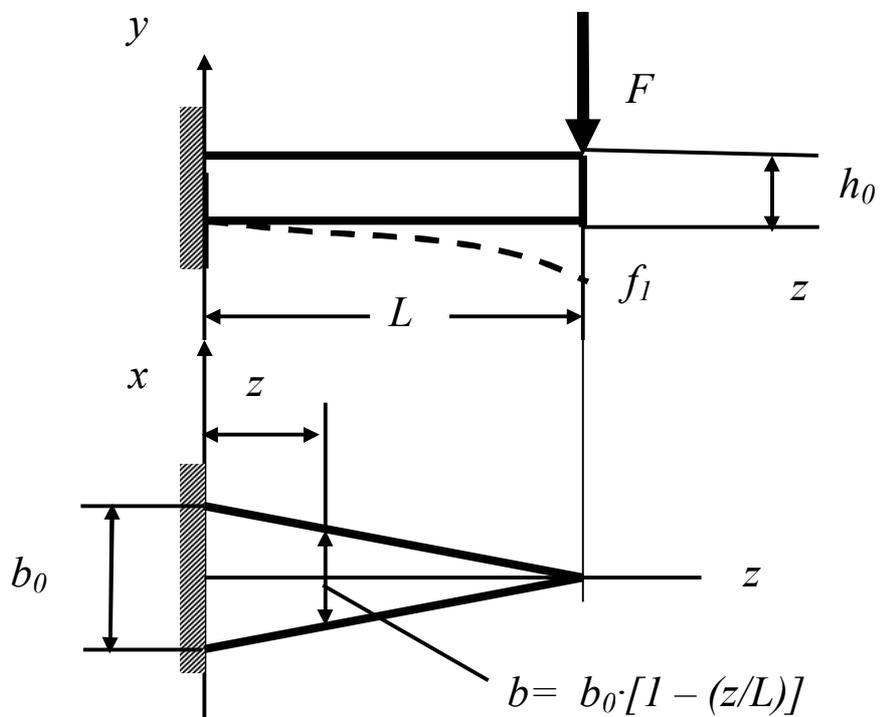


Рис. 3.18. Консольная балка, равнопрочность которой достигается изменением ширины

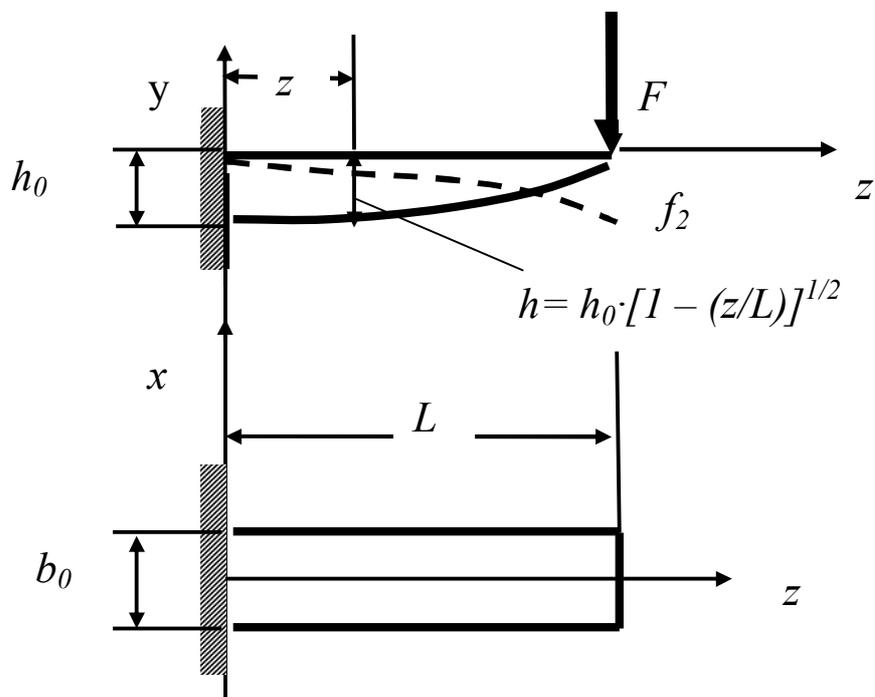


Рис. 3.19. Консольная балка, равнопрочность которой достигается изменением высоты

В первом случае высота балки остается постоянной и равной  $h = h_0$ , а ширина балки описывается формулой

$$b = b_0 \cdot [1 - (z/L)].$$

Во втором случае ширина балки остается постоянной и равной  $b = b_0$ , а высота балки удовлетворяет зависимости

$$h = h_0 \sqrt{1 - (z/L)}.$$

В обоих случаях момент сопротивления сечения изменяется по линейному закону

$$W = b_0 \cdot (h_0)^2 [1 - (z/L)]/6.$$

Поэтому нормальное напряжение по длине балки будет постоянным и равным

$$\sigma = \sigma_{\max} = 6 F \cdot L / b_0 \cdot (h_0)^2.$$

При этом происходит выигрыш в массе балки: масса балки на рис. 3.18 в 2 раза меньше массы балки постоянного поперечного сечения (рис. 3.17), а масса балки на рис. 3.19 – в 1,67 раза.

Следует иметь в виду, что равнопрочные балки, как правило, являются менее жёсткими. Так, прогиб балки  $f$  на рис. 3.18 в 1,5 раза больше прогиба балки постоянного поперечного сечения (рис. 3.17), а прогиб балки на рис. 3.19 – в 1,8 раза больше. Однако удельная жёсткость балок, т.е. отношение массы к прогибу  $g = m/f$ , для обеих равнопрочных балок одинакова и составляет 0,33 от удельной жёсткости балки постоянного сечения.

На рис. 3.20 представлены способы придания равнопрочности цилиндрической детали, опертой по концам и подвергающейся изгибу поперечной силой, приложенной посередине пролёта (рис. 3.20, а).

Момент в произвольном сечении, расположенном на расстоянии  $z$  от левой опоры, будет равен (рис. 3.20, б)

$$M = (F/2) \cdot z.$$

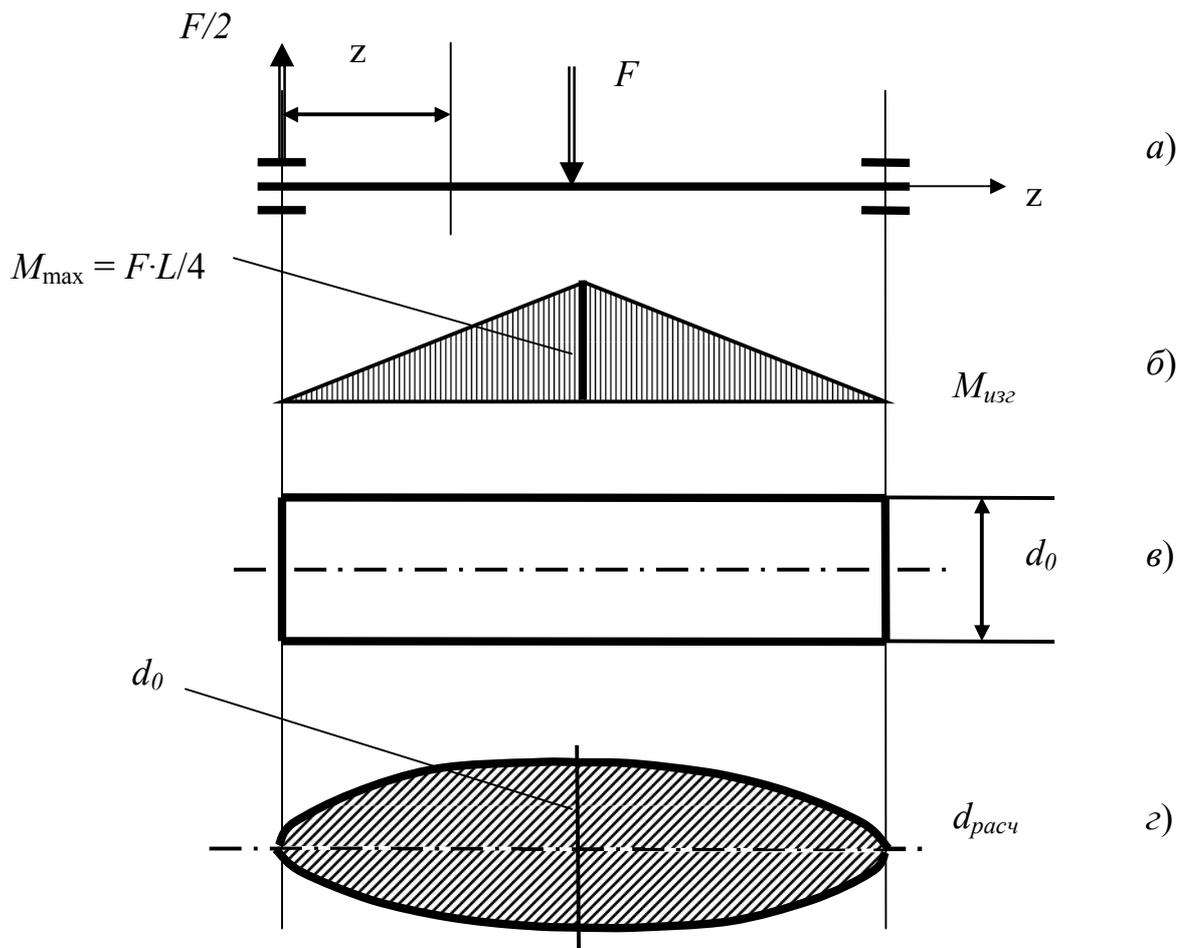


Рис. 3.20 Придание цилиндрическим деталям равнопрочности

В данном примере максимальный изгибающий момент  $M_0$  находится в центре балки и равен произведению опорной реакции  $F/2$  на расстояние  $0,5L$  от центрального сечения до плоскости действия опорной реакции, т.е.

$$M_{\max} = F \cdot L / 4.$$

Нормальное напряжение в произвольном сечении для цилиндрического бруса постоянного диаметра (рис. 3.20, в) равно

$$\sigma = \frac{M}{W} \cong \frac{10 \cdot M}{d^3} = \frac{5 \cdot F \cdot z}{d^3}.$$

Следовательно, величина напряжения изменяется по линейному закону, достигая максимального значения при  $z = 0,5L$

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} \cong \frac{10 \cdot M_{\max}}{d^3} = \frac{2,5 \cdot F \cdot L}{d^3}.$$

Для равнопрочной детали напряжения по длине должны быть одинаковыми, и поэтому её диаметр должен изменяться по формуле

$$d = \sqrt[3]{\frac{5 \cdot F \cdot z}{\sigma_{\max}}}$$

Выполнить это условие можно изменением наружной конфигурации детали вдоль оси (рис. 3.20, *г*) или удалением материала изнутри при постоянстве наружного диаметра.

### 3.3.2. Равнопрочность узлов и соединений

Осуществление принципа равнопрочности в узлах и соединениях рассмотрим на примерах.

Конструкция соединения звеньев цепного конвейера *1* (рис. 3.21, *а*) не является равнопрочной по трем признакам:

- запас прочности на разрыв у основания *b* проушин верхнего звена меньше, чем у нижнего, в 1,5 раза (отношение числа проушин на том и другом звеньях);
- запас прочности на срез пальца диаметром *d* (при обычном соотношении прочности на срез и разрыв 0,7) в 2 раза меньше запаса прочности на разрыв в проушинах нижнего звена;
- запас прочности на разрыв проушин по диаметру *D* в 1,5 раза больше, чем в их основании.

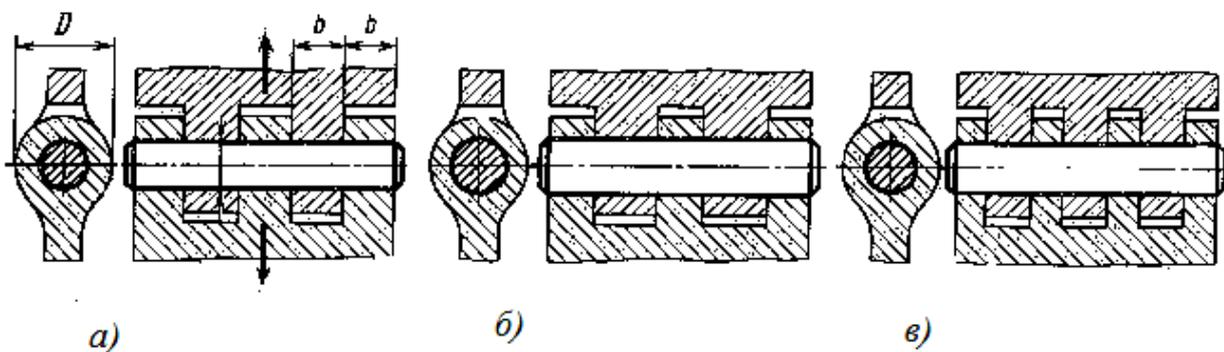


Рис. 3.21. Придание равнопрочности соединения звеньев цепного конвейера

В равнопрочной конструкции (рис. 3.21, б) суммарная ширина оснований проушин верхнего и нижнего звеньев одинакова, что обеспечивает равенство напряжений в проушинах. Диаметр пальца увеличен, а стенки проушин выполнены тоньше из условия равнопрочности. В конструкции (рис 9, в) равнопрочность пальца и проушин достигается за счёт увеличения числа плоскостей среза до шести (вместо четырех в предыдущих конструкциях), вследствие чего диаметр пальца может быть уменьшен в  $\sqrt{2/3} \approx 0,86$  раза по сравнению с конструкцией (рис. 3.21, б).

В качестве общего замечания можно отметить, что кольцевые сечения очень обманчивы при зрительной оценке на прочность. Прочность на разрыв таких деталей пропорциональна квадрату, на изгиб и кручение - кубу, а жёсткость - четвертой степени диаметра. При глазомерной оценке конструктор обычно совершает ошибку, заключающуюся в преувеличении размеров кольцевых деталей.

### 3.3.3. Контактная прочность

При контактном нагружении силы действуют на малом участке поверхности, вследствие чего в поверхностном слое металла возникают высокие местные (локальные) напряжения. Этот вид нагружения встречается при соприкосновении (контакте) сферических и цилиндрических тел с плоскими, сферическими или цилиндрическими поверхностями.

При конструировании контактно-нагруженных соединений основное внимание должно быть обращено на уменьшение напряжений путём придания соединениям рациональной формы.

В случаях, когда это допускают условия работы контакта, тела воспринимающие нагрузку следует опирать в гнездах, имеющих диаметр  $D$ , близкий к диаметру тела  $d$  ( $D/d = 1,02...1,03$ ).

Так, как даже в случае сфер и цилиндров большого диаметра поверхность контакта весьма мала, то для сокращения точной механической

обработки целесообразно придавать рабочей поверхности наименьшие приемлемые по технологии изготовления размеры (рис. 3.22).

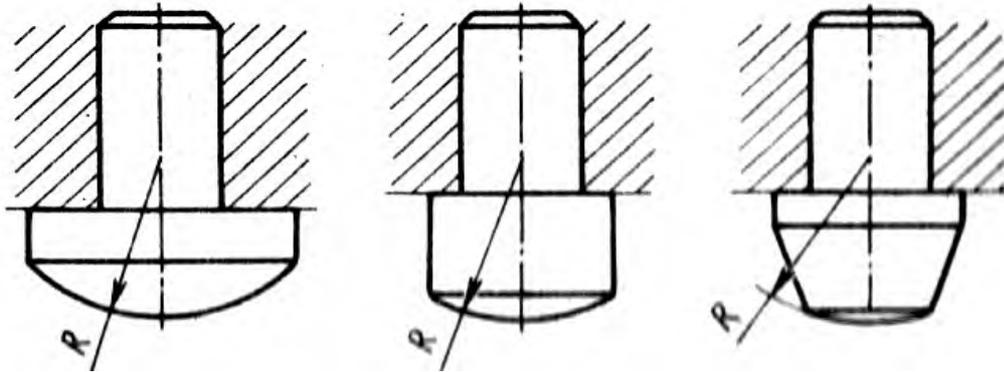


Рис. 3.22. Сокращение рабочих размеров сферической поверхности

Пример последовательного улучшения конструкции сферического соединения приведен на рис. 3.23 (узел шарикового подпятника).

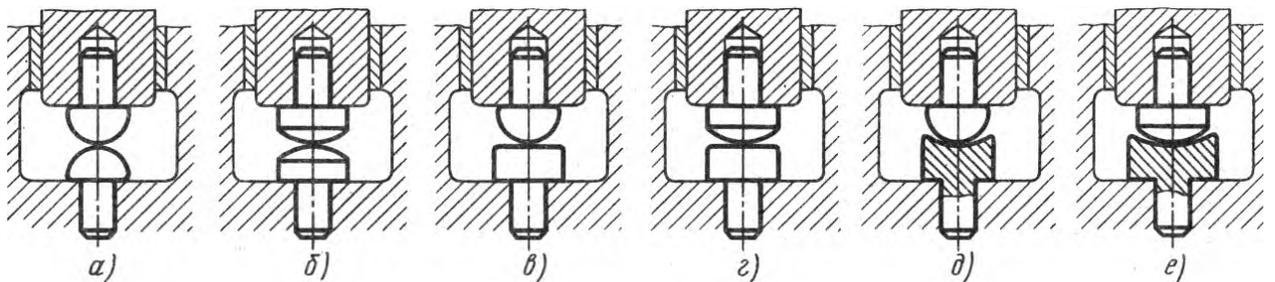


Рис. 3.23. Упрочнение сферического соединения

Попарно изображенные конструкции (а, б), (в, г) и (д, е) с точки зрения контактной прочности равноценны. Однако в первых случаях площадь обрабатываемой сферической поверхности больше, поэтому предпочтение следует отдать конструкциям, изображенным на рис. 3.23 б, г, е.

Контакт сферических поверхностей представляет собой круг, диаметр которого зависит от величины приложенной нагрузки. Максимальное напряжение  $\sigma_H$  находится в центре контактной поверхности и пропорционально кубическому корню из усилия  $F$ , деленного на эквивалентный (приведенный) радиус  $R_{э\text{кв}}$  соприкасающихся сфер, т.е.

$$\sigma_H \Rightarrow \sqrt[3]{\frac{F}{R_{экв}}} = \sqrt[3]{\frac{F \cdot (R_1 + R_2)}{R_1 \cdot R_2}}$$

Поэтому при переходе от контакта двух выпуклых сферических поверхностей (рис. 3.23, *a, б*) к контакту сферы и плоскости (рис. 3.23, *в, г*) и, наконец, к контакту выпуклой и вогнутой сферических поверхностей (рис. 3.23, *д, е*) величина максимального контактного напряжения снижается. Поэтому наиболее выгодной с точки зрения контактной прочности будет конструкция, изображенная на рис. 3.23, *е*, в которой сфера большого диаметра расположена в сферическом гнезде.

Во всех случаях, когда это возможно по конструкции, следует применять линейный контакт вместо точечного и поверхностный вместо линейного и точечного.

В рычажном механизме (рис. 3.24, *a*) рычаг *1*, совершающий колебательные движения, приводит в движение другой рычаг (на рисунке не показан) через палец *2*, скользящий в пазу рычага.

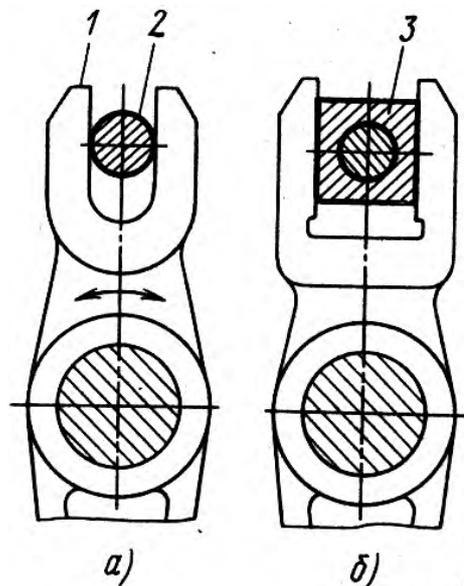


Рис. 3.24. Замена линейного контакта пальца 2 с рычагом 1 поверхностным контактом путем установки сухаря 3

Конструкция нерациональна, так как контакт на поверхностях трения происходит по линии и палец быстро изнашивает грани паза. В улучшенной

конструкции (рис. 3.24, б) на палец надет сухарь 3. Контакт между сухарём и гранями паза, а также между пальцем и отверстием сухаря происходит по поверхности, что резко снижает износ.

На рис. 3.25, а показан узел привода толкателя 1, который перемещается с помощью наклонной шайбы 2, действующей на сферический торец толкателя. Для повышения износостойкости целесообразно приводить в движение толкатель через самоустанавливающуюся пятую 3 (рис. 3.25, б) с поверхностным контактом по толкателю и шайбе.

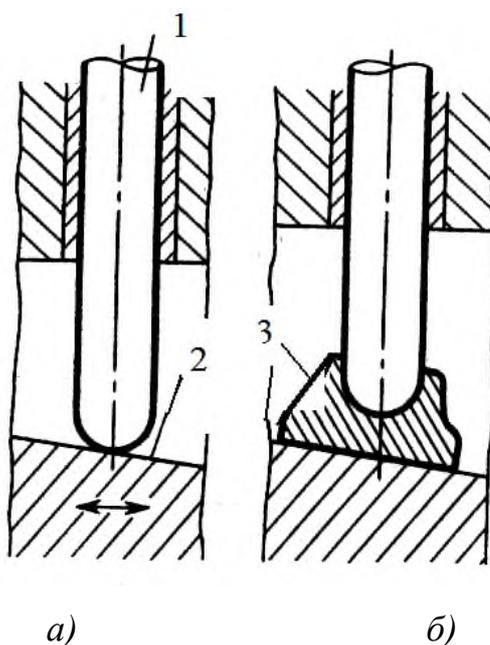


Рис. 3.25. Замена линейного контакта толкателя 2 с наклонной шайбой 1 поверхностным контактом путем установки самоустанавливающейся пяты 3

В лопастном насосе (рис. 3.26, а) лопатка 1 скользит в направляющем пазу ротора 2 и под действием центробежной силы и пружины прижимается к стенкам корпуса 3 с эксцентричным отверстием. Линейный контакт между лопаткой и отверстием корпуса можно заменить поверхностным путём установки шарнирного вкладыша 4 (рис. 3.26, б). Введение самоустанавливающегося башмака 5 (рис. 3.26, в) позволяет создать жидкостную гидродинамическую смазку.

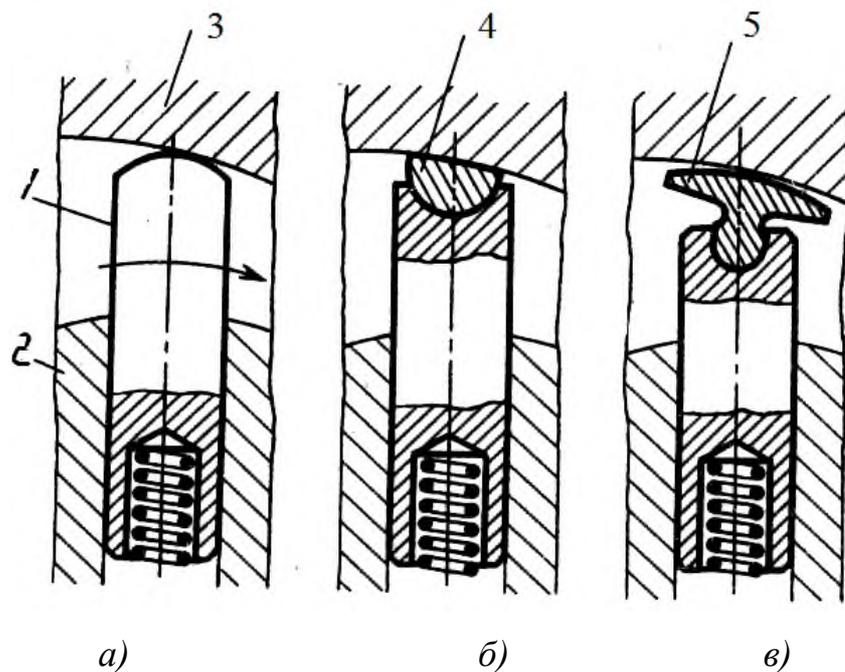


Рис. 3.26. Замена линейного контакта лопатки 1 с корпусом 3 лопастного насоса поверхностным контактом, путём установки шарнирного вкладыша 4 или самоустанавливающегося башмаком 5

Условия работы циклически нагруженных соединений резко ухудшаются, если в соединении имеется зазор. Сопряжённые поверхности периодически раздвигаются и смыкаются, а нагрузка становится ударной. При неправильной конструкции соединение быстро выходит из строя в результате перегрева, наклёпа и разбивания рабочих поверхностей.

Для увеличения работоспособности соединений, испытывающих ударные нагрузки, целесообразно следующее:

- повышать упругость системы, вводя амортизаторы, смягчающие удары;
- уменьшать напряжения на рабочих поверхностях заменой точечного и линейного контактов поверхностным контактом, а также увеличением размеров поверхности;
- придавать рабочим поверхностям повышенные прочность, твёрдость и термостойкость;
- уменьшать или полностью устранять зазоры в соединениях;

- подводить обильную смазку для создания амортизирующей масляной пленки и отвода теплоты, выделяющейся при ударах;
- уменьшать массу звеньев механизма для снижения инерционных нагрузок.

При контролируемой нагрузке следует уменьшать нагрузку и степень её ударности путём уменьшения ускорений. Например, в механизмах, приводимых в действие кулачками, применение кулачков рационального профиля - параболических и полиномиальных.

На рис. 3.27 приведен пример последовательного улучшения конструкции узла привода возвратно-поступательно движущегося штока. Так как между поверхностями контакта неизбежен зазор  $h$ , то нагрузка имеет ударный характер. В процессе работы движение коромысла  $I$  сопровождается смещением бойка по торцу штока, что делает условия работы соединения ещё более тяжёлыми.

Работоспособность соединения можно повысить установкой закалённых до высокой твёрдости бойка и наконечника на штоке (конструкция 2). Недостаток конструкции - точечный контакт.

Условия работы сочленения можно улучшить, если сферическую поверхность бойка заменить цилиндрической поверхностью большого радиуса, обеспечивающей линейный контакт с пониженными контактными напряжениями (конструкция 3).

Ещё лучше конструкция 4, где трение скольжения заменено трением качения. В наиболее целесообразных конструкциях 5 и 6 боёк выполнен в виде сферического вкладыша с плоской рабочей поверхностью.

Линейный контакт здесь заменен поверхностным, вследствие чего давления на рабочих поверхностях резко снижаются. Благодаря сферической форме головки вкладыша соединение обладает свойством самоустанавливаемости, что обеспечивает равномерное распределение нагрузок на рабочей поверхности при возможных перекосах системы.

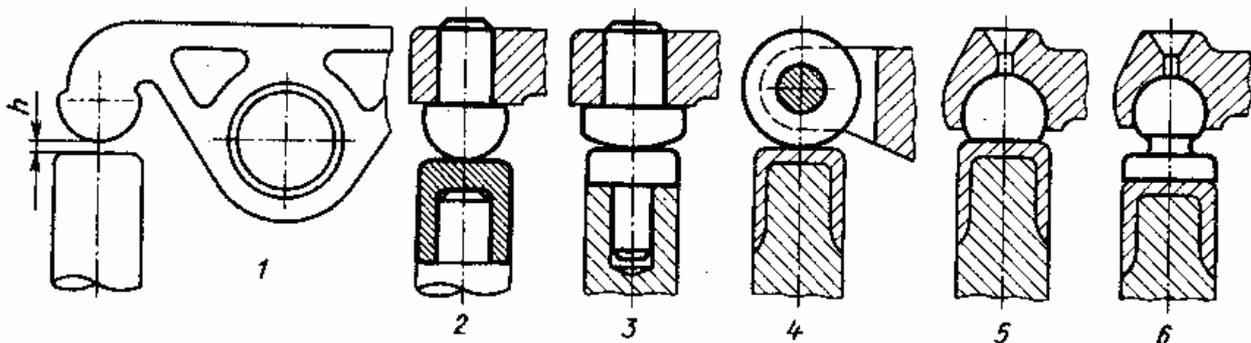


Рис. 3.27. Повышение работоспособности соединений, подвергающихся ударным нагрузкам

### 3.3.4. Температурные напряжения и деформации

#### Температурные напряжения.

Повышенные температуры наблюдаются не только в тепловых машинах, у которых нагрев является следствием рабочих процессов. В других машинах нагреваются механизмы, работающие при высоких скоростях и больших нагрузках (зубчатые передачи, подшипники, кулачковые механизмы и т. д.). Детали, подверженные циклическим нагрузкам, нагреваются в результате упругого гистерезиса при многократно повторных циклах нагружения-разгружения.

Повышение температуры сопровождается изменением линейных размеров деталей и, если при колебаниях температуры конструктивный элемент лишён возможности свободно расширяться или сжиматься, то происходит ограничение температурных деформаций, приводящее к появлению температурных напряжений.

Рассмотрим пример соединения деталей, имеющих при работе различную температуру и/или выполненных из материалов с неодинаковыми коэффициентами линейного расширения. Пусть болт 1 и втулка 2 (рис. 3.28) изготовлены из материалов с коэффициентами линейного расширения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$

и их температуры равны соответственно  $t_1$  и  $t_2$ . При нагреве от исходной температуры  $t_0$  болт и втулка в свободном состоянии удлинились бы на величины

$$\Delta l_1 = l \cdot \alpha_1 \cdot \Delta t_1 \quad \text{и} \quad \Delta l_2 = l \cdot \alpha_2 \cdot \Delta t_2$$

где  $\Delta t_1 = t_1 - t_0$ ;  $\Delta t_2 = t_2 - t_0$ ;  $l$  — длина соединения.

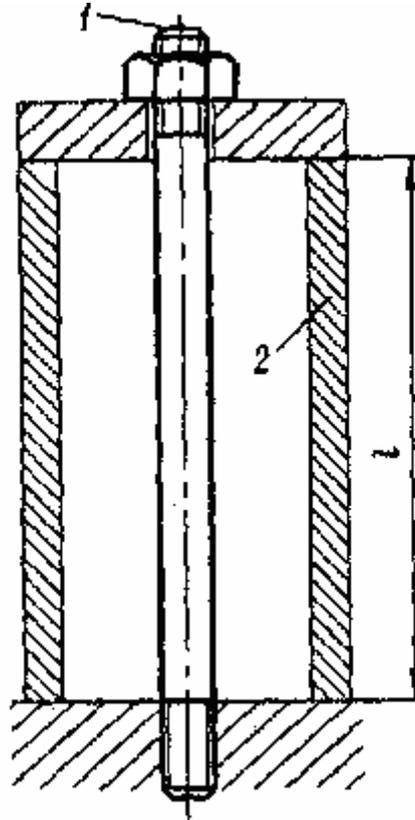


Рис. 3.28. Схема определения температурных напряжений болта 1 и втулки 2

В стянутой системе образуется температурный натяг

$$\Delta l_t = l \cdot (\alpha_2 \Delta t_2 - \alpha_1 \Delta t_1),$$

или в относительных единицах

$$\varepsilon_t = (\alpha_2 \Delta t_2 - \alpha_1 \Delta t_1).$$

В соединении возникает термическая сила  $F_t$ , вызывающая согласно закону Гука деформацию растяжения болта  $\varepsilon_1$  и сжатия  $\varepsilon_2$ :

$$\varepsilon_1 = F_t / \lambda_1, \quad \varepsilon_2 = F_t / \lambda_2,$$

где  $\lambda_1 = E_1 A_1$  и  $\lambda_2 = E_2 A_2$  — коэффициенты жёсткости соответственно болта и втулки ( $A_1$  и  $A_2$  — площади сечений болта и втулки).

### Сумма относительных деформаций

$$\varepsilon_t = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = (F_t / \lambda_1) + (F_t / \lambda_2).$$

Откуда

$$F_t = \varepsilon_t \lambda_1 / (1 + \lambda_1 / \lambda_2).$$

На практике часто температура обеих деталей одинакова, т.е.  $t_1 = t_2 = t$ , например, в машинах при установившемся тепловом режиме. Тогда

$$F_t = t \cdot (\alpha_2 - \alpha_1) \lambda_1 / (1 + \lambda_1 / \lambda_2).$$

Возможны три случая:

1.  $\alpha_2 > \alpha_1$  - стяжка деталей из алюминиевых, магниевых и медных сплавов стальными болтами и болтами из титановых сплавов. При нагреве в соединениях возникает натяг, пропорциональный произведению  $t \cdot (\alpha_2 - \alpha_1)$ . При охлаждении до минусовых температур этот фактор становится отрицательным, и поэтому первоначальный сборочный натяг уменьшается, т.е. снижается несущая способность соединения.

2.  $\alpha_1 > \alpha_2$  - стяжка стальных и чугунных деталей болтами из аустенитных сталей, стяжка деталей из титановых сплавов стальными болтами. При нагреве произведение  $t \cdot (\alpha_2 - \alpha_1)$  становится отрицательным, т.е. первоначальный натяг уменьшается и нагрузочная способность соединения снижается. При охлаждении до минусовых температур произведение положительно, т.е. первоначальный натяг увеличивается.

3.  $\alpha_1 = \alpha_2$  - стяжка стальных и чугунных деталей стальными болтами, стяжка деталей из титановых сплавов титановыми болтами. В этом случае  $t \cdot (\alpha_2 - \alpha_1) = 0$ , т.е. натяг при нагреве и охлаждении не меняется.

Напряжение растяжения в болте и сжатия во втулке равны

$$\sigma_{t1} = F_t / A_1 = E_1 \varepsilon_t (1 + \lambda_1 / \lambda_2),$$

$$\sigma_{t2} = F_t / A_2 = E_2 \varepsilon_t (1 + \lambda_1 / \lambda_2).$$

Отношение  $\sigma_{t1} / \sigma_{t2} = A_2 / A_1$  не зависит от модулей упругости материалов шпильки и втулки и определяется только соотношением сечений последних.

Тепловые напряжения возникают при неравномерном нагреве детали, когда отдельные волокна материала лишены возможности по конфигурации

детали расширяться в соответствии с законом тепловой деформации. В отличие от предыдущего случая здесь напряжения возникают только при перепаде температур в теле детали (при стационарном тепловом потоке, когда тепло переходит от горячих участков к более холодным, или при неустановившемся тепловом потоке, например при тепловом ударе, когда волна тепла распространяется по телу детали).

Как общее правило, горячие участки детали с температурой, превышающей среднюю, испытывают напряжения сжатия, а более холодные – напряжения растяжения. Это же справедливо при минусовых температурах: менее холодные участки подвергаются сжатию, а более холодные – растяжению. Тело, имеющее во всех своих частях одинаковую температуру, термических напряжений не испытывает.

Рассмотрим плоскую стенку (пластинку) толщиной  $s$ , через которую в направлении, перпендикулярном ее плоскости, проходит равномерный тепловой поток (рис. 3.29, а). Пусть поверхность стенки, обращенная к источнику теплоты, имеет температуру  $t_1$ , а противоположная поверхность  $t_2$ , причем  $t_1 > t_2$ . Из теории теплопередачи известно, что температура поперёк стенки изменяется по прямолинейному закону. Средняя температура стенки  $t_{cp} = 0,5 \cdot (t_1 + t_2)$ . Мысленно расчём пластинку на ряд тонких параллельных слоёв. Если бы все они имели возможность свободно расширяться под действием температуры, то слои с температурой выше  $t_{cp}$  удлинились бы по сравнению со средним слоем, а слои с температурой ниже  $t_{cp}$  приобрели бы размеры меньше размеров среднего слоя, и пластинка приняла бы форму изображенную на рис. 3.29, б.

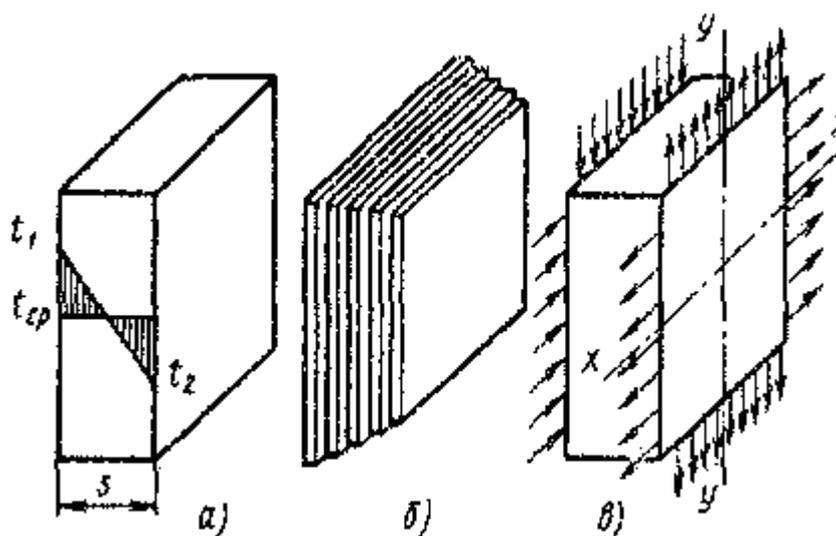


Рис. 3.29. Схема к определению термических напряжений в пластинке

Если пластинка сохраняет при нагреве плоскую форму, то все слои в силу совместности деформации должны иметь одинаковые размеры, равные размерам среднего слоя. В такой пластинке наиболее нагретые слои сжаты тормозящим действием соседних более холодных слоёв, а наиболее холодные - растянуты действием более горячих слоёв (рис. 3.29, в), каждый по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Наибольшие напряжения возникают в крайних, поверхностных слоях.

#### **Температурные деформации.**

В узлах, состоящих из деталей, имеющих различную рабочую температуру или изготовленных из материалов с разными коэффициентами линейного расширения, тепловые деформации могут существенно влиять на взаимное расположение деталей. При нагреве в соединениях возникают термические зазоры или натяги, которые необходимо учитывать при назначении сборочных (холодных) зазоров.

Примером может служить конструкция фиксирующего подшипника скольжения (рис. 3.30).

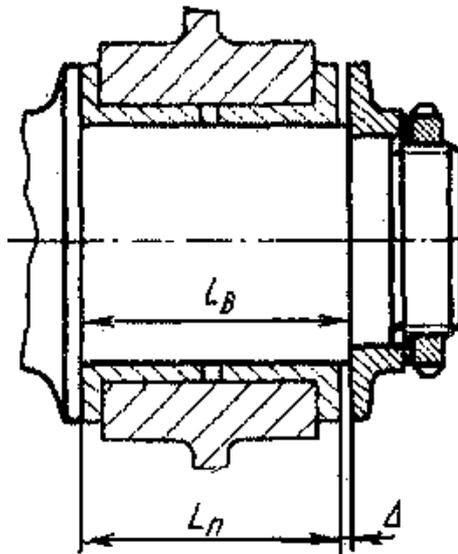


Рис. 3.30. Термические осевые зазоры  $\Delta$

Пусть вал изготовлен из стали с коэффициентом линейного расширения  $\alpha_1$ , а корпус подшипника, из сплава с  $\alpha_2$ . Рабочие температуры соответственно равны  $t_1$  и  $t_2$ . В зависимости от соотношения величин  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $t_1$ ,  $t_2$  первоначальный зазор  $\Delta$  может увеличиться или уменьшиться. Опасен последний случай, так как вал может оказаться защемленным по торцам.

Фиксирующие базы следует выбирать с таким расчётом, чтобы при всех возможных температурных изменениях размеров системы точность расположения деталей не нарушалась или нарушалась бы в наименьшей мере. В узле конической передачи, установленной в корпусе из легкого сплава (рис. 3.31, а) фиксирующий подшипник 1 расположен на значительном расстоянии  $L$  от центра зацепления зубчатых колес.

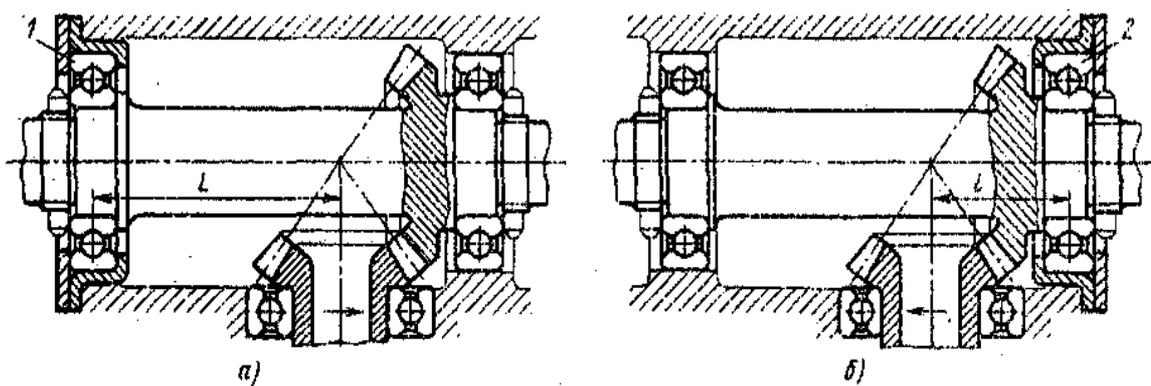


Рис. 3.31. Фиксация вала конической передачи

Удлинение корпуса при нагреве вызывает смещение малого колеса передачи в направлении, указанном стрелкой. Большое колесо перемещается в том же направлении, но на меньшую величину (вследствие меньшего значения коэффициента линейного расширения стального вала). В результате зазор в зацеплении уменьшается. При известных соотношениях зубчатые колёса могут начать работать враспор.

В правильной конструкции (рис. 3.31, б) фиксирующим является задний подшипник 2, расположенный на сравнительно малом расстоянии  $L$  от центра зацепления. Смещения колес относительно друг друга при нагреве здесь гораздо меньше, кроме того, зазор в зацеплении с нагревом увеличивается, а не уменьшается, как в предыдущем случае.

Для обеспечения свободы температурным перемещениям следует избегать осевой фиксации деталей в двух точках. При наличии температурных деформаций в случае такой фиксации могут появиться температурные напряжения.

Примером ошибочной установки является фиксация вала в двух подшипниках качения одновременно (рис. 3.32, а). Если корпус подшипников выполнен из материала с иным коэффициентом линейного расширения, чем вал, а также если вал и корпус имеют различные рабочие температуры, то в узле возникает зазор или натяг. Последний может привести к защемлению подшипников. Неизбежные погрешности выполнения осевых размеров соединения, в свою очередь, могут вызвать появление зазоров или натягов.

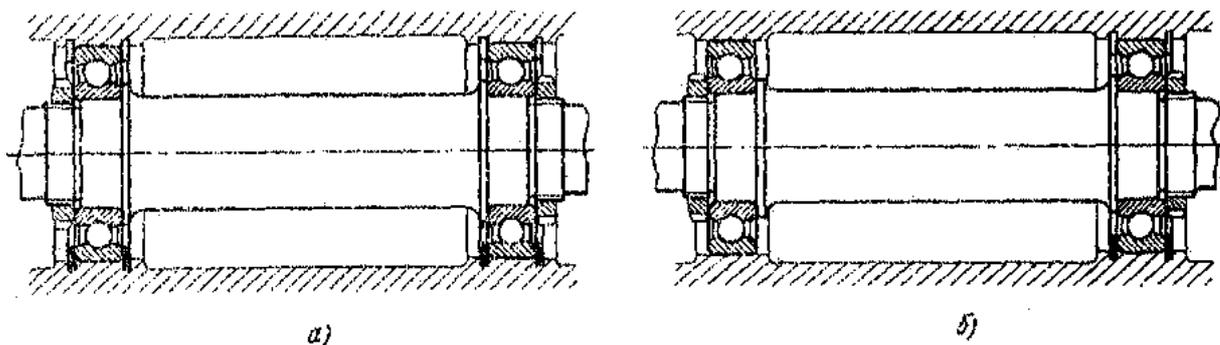


Рис. 3.32. Неправильная (а) и правильная (б) фиксация подшипников качения

Вал следует фиксировать в одном подшипнике (рис. 3.32, б). Второй подшипник должен быть плавающим, т.е. иметь свободу перемещения в осевом направлении.

Следует обеспечивать свободу перемещения крепежных лап машины и агрегатов, нагревающихся при работе. Одну из лап (или ряд лап, расположенных в линию) закрепляют жёстко, остальным придают свободу перемещения. На рис. 3.33 приведена типовая конструкция лапы крепления корпуса к фундаменту (направление термического расширения корпуса показано стрелкой). Лапу крепят фундаментным болтом, пропущенным через продолговатое отверстие. Между шайбой болта и торцом лапы оставляют зазор  $e = 0,05 \dots 0,1$  мм.

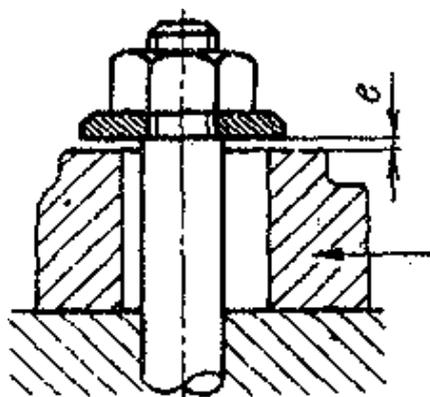


Рис. 3.33. Узел крепления корпуса к фундаменту

### 3.3.5. Сопротивление усталости

#### Общие понятия.

Детали, подвергающиеся длительной повторно-переменной нагрузке, разрушаются при напряжениях, значительно меньших предела прочности материала при статическом нагружении. Это имеет большое значение для современных быстроходных машин, детали которых работают в условиях циклических нагрузок при общем числе циклов, достигающем за весь период службы машины многих миллионов. Как показывает статистика, около 80% поломок аварий, происходящих при эксплуатации машин, вызвано

усталостными явлениями. Поэтому проблема сопротивления усталости является ключевой для повышения надёжности машин.

Циклические нагрузки выражены наиболее явно в машинах и механизмах с поступательно-возвратным движением звеньев (поршневые машины, кулачковые механизмы). Однако и в роторных машинах неизбежны циклические нагрузки, например, вследствие дисбаланса, радиальных и торцевых биений роторов т.п.

В зубчатых передачах зубья всегда подвержены циклическим нагрузкам. Валы, работающие под нагрузкой постоянного направления (валы нереверсивных зубчатых, ременных и цепных передач) также подвергаются циклической нагрузке.

Например, в случае двухопорного вала зубчатого колеса крутящий момент, передаваемая валом, и сила в зацеплении вызывает его изгиб и соответствующие напряжения в постоянной поперечной плоскости. За один оборот все точки поверхности вала в опасном сечении один раз проходят через зону максимального напряжения растяжения и один раз – через зону максимального напряжения сжатия. При каждом обороте цикл повторяется. Таким образом, не смотря на постоянство нагрузки и ее направления, здесь имеет место циклическое нагружение.

Число циклов нагрузок, которые материал выдерживает до разрушения, зависит от максимальной разницы между крайними значениями напряжений цикла. По мере уменьшения напряжений число циклов до разрушения увеличивается и при некотором достаточно малом напряжении становится неограниченно большим. Это напряжение, называемое *пределом выносливости*, лежит в основе прочностного расчёта деталей, подверженных циклическим нагрузкам.

#### **Факторы, влияющие на предел выносливости.**

Предел выносливости деталей зависит от условий нагружения, типа цикла, формы и размеров детали, технологии её изготовления, состояния поверхности и других факторов.

Циклическая прочность деталей снижается на участках ослаблений, резких переходов, углов, надрезов и других концентраторов напряжений, максимум которых может в 2...5 и более раз превышать средний уровень напряжений, действующих в этом сечении. Степень повышения местных напряжений зависит в первую очередь от вида и формы ослабления. Чем больше перепад сечений на участке перехода и чем резче переходы и острее подрезы, тем выше местное максимальное напряжение.

Явление концентрации напряжений, вызванное формой, на практике усугубляется тем обстоятельством, что участки расположения концентраторов почти всегда ослаблены по технологическим причинам.

У деталей, подвергающихся механической обработке, ослабление на участках переходов наступает в результате перерезания волокон, полученных при предшествующей горячей обработке давлением. У литых деталей участки переходов, как правило, ослаблены литейными дефектами, вызванные нарушением структуры при кристаллизации металла и охлаждения отливки. В этих участках обычно сосредотачиваются рыхлоты, пористость, микротрещины и возникают внутренние напряжения. У кованных и штампованных деталей участки переходов имеют пониженную прочность вследствие вытяжки металла на этих участках. Сильными концентраторами являются внутренние дефекты материала: раковины, пористость, микротрещины, флокены, неметаллические включения (оксиды, силициды и др.)

Концентрация напряжений может быть вызвана не только формой детали и внутренними дефектами, но и действием сопряженных деталей.

Вследствие отклонения физико-механических свойств материалов от идеальных действительное повышение напряжений отличается от теоретического, будучи, как правило, меньше последнего. Действительное повышение напряжений определяют экспериментально и характеризуют *эффективным коэффициентом концентрации напряжений*

$$k_3 = \sigma_{max} / \sigma_{ном},$$

где  $\sigma_{max}$  – действительное максимальное напряжение на участке ослабления.

Предел выносливости геометрически подобных деталей снижается с увеличением их абсолютных размеров. Влияние размеров характеризуют масштабным фактором  $\epsilon_k$ , представляющим собой отношение предела выносливости  $\sigma$  образца данных размеров к пределу выносливости  $\sigma_{обр}$  лабораторного образца стандартных размеров из того же материала:

$$\epsilon_k = \sigma / \sigma_{обр}$$

Циклическая прочность зависит от состояния поверхности, особенно в тех случаях нагружения, когда наибольшие напряжения возникают в поверхностных слоях (изгиб, кручение, сложные напряжённые состояния).

Грубая механическая обработка, вызывающая пластические сдвиги, надрывы и микротрещины в поверхностном слое, резко снижает предел выносливости, тонкая (полирование, суперфиниширование) – повышает. Это явление особенно резко выражено у деталей небольших размеров и слабее у крупных деталей. Последнее объясняется присущими крупным деталям неоднородности структуры, действие которых пересиливает действие концентраторов, вызванных механической обработкой. Предел выносливости снижается при наличии случайных царапин и повреждений поверхностного слоя, а также износа поверхности. Резкое падение циклической прочности наблюдается при коррозии.

Предел выносливости детали обычно представляют в следующем виде

$$\sigma_{дет} = k_{кач}(\epsilon_k / k_3) \sigma_{обр},$$

где  $\sigma_{обр}$  – предел выносливости гладкого полированного образца из данного материала при данном виде упрочняющей обработки;  $k_{кач}$  – коэффициент качества обработки;  $\epsilon_k$  – масштабный фактор;  $k_3$  – эффективный коэффициент концентрации напряжений.

Более достоверным является путь натурального испытания детали на режиме, возможно полно воспроизводящем рабочие режимы и спектр

нагружения. При этом непосредственно учитываются конструктивные особенности детали.

### **Технологические способы повышения усталостной прочности.**

В случаях, когда не удастся ликвидировать циклические нагрузки или снизить циклические напряжения, следует прибегать к специальным способам повышения сопротивления усталости. Их можно разделить на технологические способы, в которых эффект достигается специальными приёмами обработки, и конструктивные способы придания деталям форм, более благоприятных для циклической прочности.

Упрочняющая термообработка и химико-термическая обработка повышает предел выносливости примерно пропорционально увеличению показателей статической прочности. Наибольший эффект дает закалка с низким отпуском, увеличивающая предел выносливости в 2...2,5 раза по сравнению с нетермообработанной сталью. Высокую циклическую прочность обеспечивает изотермическая закалка на бейнит, а также термомеханическая обработка.

*При поверхностной закалке* (закалка с нагревом ТВЧ, газопламенная, плазменная и лазерная закалка) и *химико-термической обработке* (цементация, нитроцементация, азотирование) упрочнение обусловлено главным образом возникновением в поверхностном слое остаточных сжимающих напряжений вследствие образования структур большего удельного объема (мартенсит при поверхностной закалке, нитриды и карбонитриды при нитроцементации и азотировании), чем структуры основного металла. Расширение поверхностного слоя тормозит сердцевина, сохраняющая исходную перлитную структуру и удельный объём, вследствие чего в поверхностном слое возникают двухосные (а в цилиндрических деталях - трехосные) напряжения сжатия.

Создание предварительных напряжений сжатия уменьшает коэффициент амплитуды и смещает средние напряжения циклов в область сжатия, что повышает предел выносливости.

Из перечисленных выше видов химико-термической обработки наиболее эффективно азотирование, которое практически полностью устраняет влияние концентраторов напряжений. Для азотированных деталей чувствительность к концентрации напряжений весьма мала (т.е. эффективный коэффициент концентрации напряжений  $k_s \approx 1$ ). Азотирование почти не вызывает изменения формы и размеров деталей. Это позволяет во многих случаях устранить заключительное шлифование и сопутствующие ему дефекты, снижающие прочность. Кроме того, азотированный слой обладает повышенной коррозионной и термической стойкостью. Твердость и упрочняющий эффект, в противоположность обычной термообработке, сохраняются до высоких температур (500...600 °С). Сочетание этих качеств делает азотирование ценным способом обработки деталей, работающих при повышенных температурах и подвергающихся высоким циклическим нагрузкам и износу (коленчатые валы, тяжело нагруженные зубчатые колёса). Из-за сложности защиты отдельных участков от насыщения азотом, а также во избежание скачков напряжений на переходных участках детали обычно азотируют кругом.

Поверхности деталей, работающих при высоких циклических нагрузках, следует обрабатывать с минимальной, экономически приемлемой шероховатостью. Отделочные операции (полирование, притирка, суперфиниширование) способствуют повышению сопротивления усталости особенно у деталей из прочных и твердых материалов.

Шлифование на обычных режимах (скорость резания 30...50 м/с) вызывает серьёзные повреждения поверхностного слоя. Наиболее частые дефекты шлифованных поверхностей - микротрещины и прижоги резко снижают циклическую прочность. Для циклически нагруженных деталей применяют микрошлифование - шлифование мелкозернистыми кругами при небольших скоростях резания (3...5 м/с) и ленточное шлифование (лентами, шаржированными абразивными микропорошками). В отличие от шлифования абразивными кругами, при котором происходят срезание и

вырыв зёрен, при ленточном шлифовании преобладают процессы сглаживания и пластической деформации микронеровностей.

Один из главных способов повышения циклической прочности является *поверхностное пластическое деформирование* (ППД), т.е. наклёп поверхностного слоя на глубину 0,2...0,8 мм с целью создания в нем остаточных напряжений сжатия. При пластическом деформировании поверхностного слоя в нем возникают двухосные (у цилиндрических деталей - трехосные) напряжения сжатия, а в толще основного металла — незначительные реактивные напряжения растяжения.

Складываясь с рабочими напряжениями растяжения, остаточные напряжения сжатия уменьшают, а при достаточно большом значении компенсируют их.

Возникающие при наклёпе множественные искажения структуры (деформация зёрен, местные пластические сдвиги) эффективно тормозят развитие усталостных повреждений и расширяют область существования нераспространяющихся трещин, увеличение которых и обуславливает повышение разрушающего напряжения.

Упрочнению ППД поддаются стали улучшенные, закалённые, цементованные и азотированные, высокопрочные и ковкие чугуны и титановые сплавы. Хуже поддаются упрочнению хрупкие материалы (серые чугуны). Наклёпу можно подвергать ферритные и перлитные чугуны, хотя эффект наклёпа здесь меньше и опасность перенаклёпа больше, чем для пластичных материалов.

Наклёп алюминиевых и магниевых сплавов повышает их предел выносливости незначительно (на 15...30%).

Наклёпанный слой чувствителен к нагреву. Повышение температуры до 150...200<sup>0</sup>С мало снижает напряжения сжатия, созданные наклёпом, но при более высоких температурах остаточные напряжения уменьшаются. Нагрев до 400...500<sup>0</sup>С полностью ликвидирует действие наклёпа вследствие

наступающего при этих температурах процесса рекристаллизации, устраняющего кристаллоструктурные изменения, внесённые наклёпом.

Основные способы поверхностного упрочнения: дробеструйная обработка, обкатывание, чеканка, алмазное выглаживание.

*Дробеструйная обработка* заключается в наклёпе поверхностного слоя потоком стальных закалённых шариков диаметром 0,5...1,5 мм, создаваемым пневматическими или центробежными дробемётами. Дробеструйной обработке можно подвергать фасонные поверхности. Качество поверхности при наклёпе несколько снижается (на 1-2 класса шероховатости по сравнению с исходной), вследствие чего точные поверхности необходимо после наклёпа подвергать финишным операциям.

Поверхности вращения упрочняют *обкатыванием стальными закалёнными роликами (шариками)*. Силу прижатия ролика выбирают с таким расчётом, чтобы создать в поверхностном слое напряжения, превышающие предел текучести материала в условиях всестороннего сжатия (для сталей 5000...6000 МПа).

С целью уменьшения давления на ролик применяют вибрационное обкатывание (ролику сообщают колебания в радиальном направлении с помощью пневматического или электромагнитного вибратора).

Плоские поверхности упрочняют обкатыванием шариками, установленными во вращающемся патроне. Заготовке придают движения продольной и поперечной подачи. При правильно выбранном режиме обкатывания остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое составляют 800...1000 МПа. Глубина уплотнения слоя 0,2...0,5 мм.

В отличие от дробеструйной обработки обкатывание роликами (шариками) улучшает качество поверхности.

Так как размеры детали после обкатывания практически не меняются, то обкатывание можно применять как заключительную технологическую операцию. Возможность точной и чистовой обработки после обкатывания не

исключается, как установлено опытами, снятие наклёпанного слоя на глубину 0,05-0,1 мм не снижает заметно упрочняющего эффекта.

*Алмазное выглаживание* заключается в обработке предварительно шлифованной и полированной поверхности закругленным алмазным резцом. Процесс применим как для пластичных материалов, так и для термообработанных до высокой твердости (закалка с нагревом ТВЧ, азотирование). При алмазном выглаживании поверхностный слой уплотняется на глубину 0,3...0,5 мм, а в нём возникают высокие (1000...2500 МПа) остаточные напряжения сжатия. Качество поверхности значительно улучшается. Микрорельеф приобретает благоприятные для циклической прочности плавные очертания.

### **Конструктивные способы повышения усталостной прочности.**

Если устранить концентраторы напряжений полностью невозможно, то следует заменять сильные концентраторы умеренно действующими. Например, резьбовые отверстия, принадлежащие к числу наиболее сильных концентраторов, целесообразно заменять гладкими отверстиями, отрицательный эффект которых меньше и может быть ослаблен рядом мер. Концентраторы следует удалять из наиболее напряжённых участков детали и переносить, если это допускает конструкция, в зоны наименьших напряжений. С целью уменьшения номинальных напряжений целесообразно увеличивать сечения детали на участках расположения концентраторов.

Концентрацию напряжений во входящих углах ступенчатых деталей, например ступенчатых валов, можно значительно снизить рациональной формой сопряжения ступеней.

Острые углы на участках перехода (рис. 3.34) вызывают значительную концентрацию напряжений, которые в 3 и более раз превышают номинальные значения.

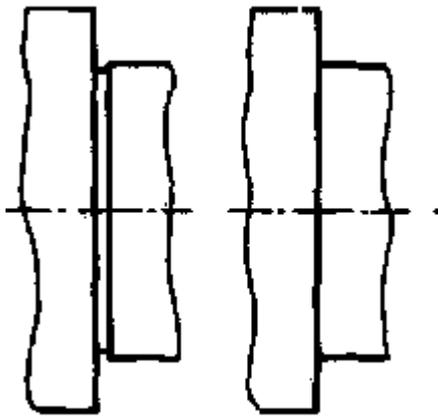


Рис. 3.34. Типичные концентраторы напряжений ступенчатых валов

Для снижения концентрации напряжений на переходных участках можно применить конические сопряжения (рис. 3.35, *а*), но они сокращают длину цилиндрической поверхности малого диаметра. Поэтому их применяют только на свободных переходах, где деталь конструктивно не связана со смежными деталями. Чаще всего, для снижения концентрации напряжений на участках перехода вводят галтели, выполненные по радиусу (рис. 3.35, *б-в*) или эллипсу (рис. 3.35, *г*).

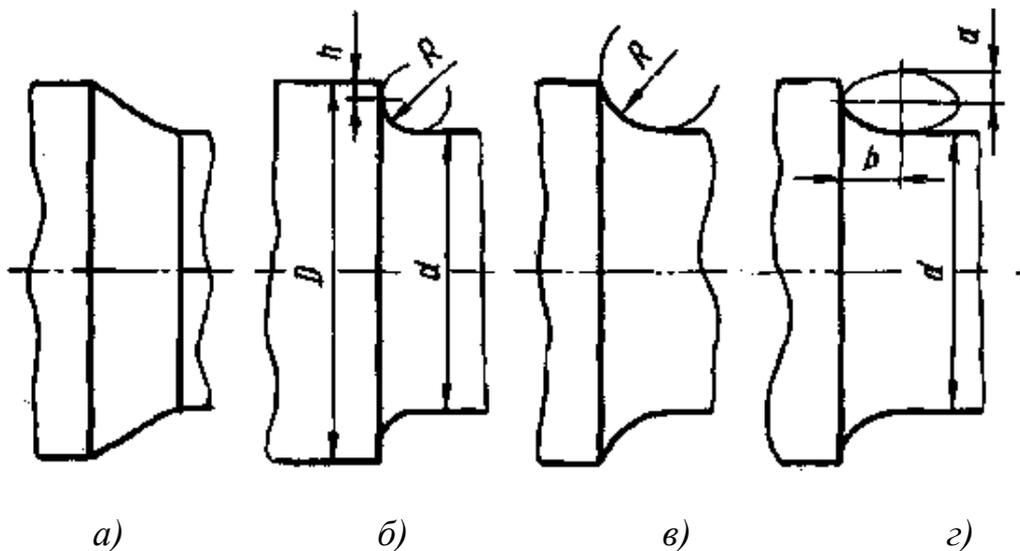


Рис. 3.35. Снижение концентрации напряжений ступенчатых валов применением конического сопряжения (*а*) и галтелей, выполненных по радиусу (*б, в*) или эллипсу (*г*)

Для наиболее распространённого случая (рис. 3.35, б-в) концентрация напряжений падает с уменьшением перепада диаметров и увеличением относительного радиуса галтели  $\rho = R/d$  (рис. 3.36).

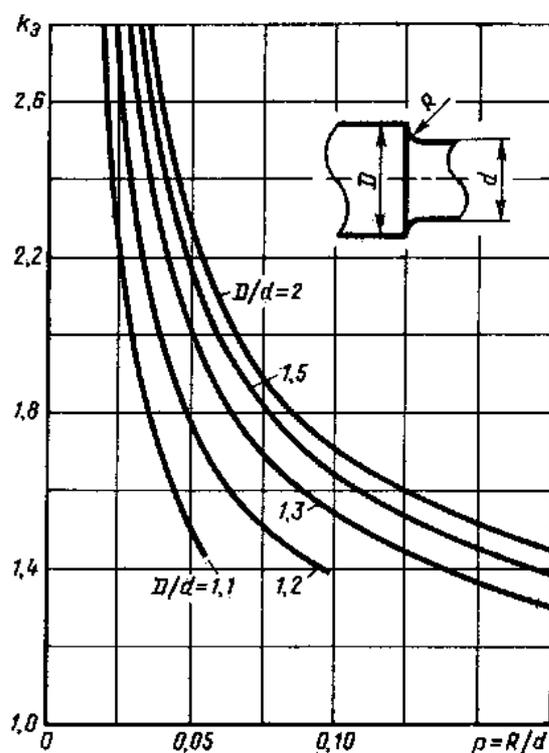


Рис. 3.36. Эффективный коэффициент концентрации напряжений  $k_\sigma$  при изгибе ступенчатых валов

Достаточно низкие значения эффективного коэффициента концентрации напряжений ( $k_\sigma = 1,5$ ) получаются при  $\rho = 0,05 \dots 0,08$  для малых  $D/d$  и  $\rho = 0,1 \dots 0,15$  для больших перепадов диаметров.

Эллиптические галтели (рис. 3.34, г) обеспечивают при одинаковых перепадах диаметров относительно большее (примерно на 20%) увеличение прочности. Эффективность таких галтелей зависит от отношения большой полуоси  $b$  эллипса к диаметру  $d$  вала. При  $b = (0,4 - 0,45) d$  и  $a/b = 0,4$  коэффициент концентрации напряжений не превышает 1,5. Недостатком эллиптических галтелей является сокращение длины цилиндрической части вала, что нежелательно в случаях установки насадных деталей, а также при установке шейки вала в подшипниках скольжения.

На рис. 3.37 представлены способы перекрытия галтелей повышенной прочности при установке насадных деталей, например подшипников качения, имеющих небольшой радиус закругления или фаску на входе. В случае круговых галтелей большого радиуса (*а*, *б*) и эллиптических галтелей (*в*) эти приёмы сводятся к установке промежуточных шайб *1* с выемками под галтель.

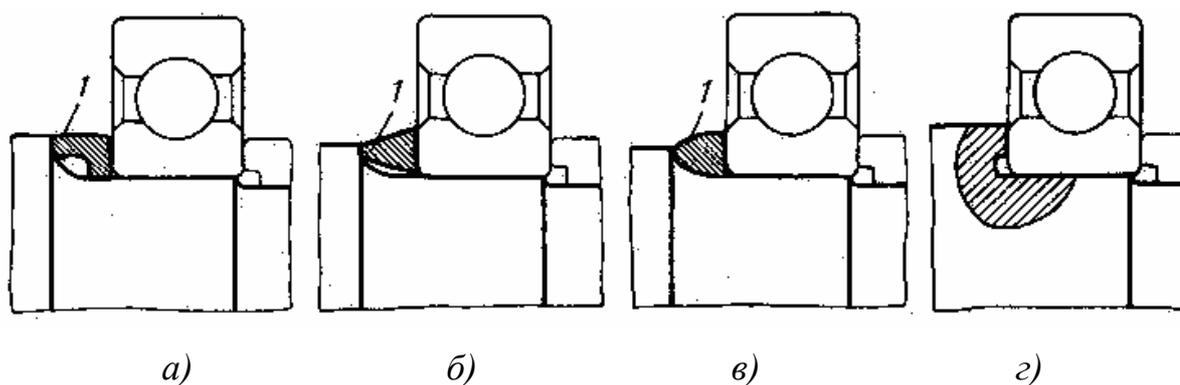


Рис. 3.37. Установка подшипников на валах с галтелями

Сокращения длины цилиндрической части вала можно избежать, если применить поднутренные галтели (рис. 3.36, *з*), которые по эффективности приблизительно равноценны круговым галтелям с одинаковыми значениями  $R/d$ . Поднутрение целесообразно применять в случаях сопряжения цилиндрических валов с призматическими частями, когда есть место для расположения галтели достаточно большого радиуса.

Важным правилом конструирования циклически нагруженных деталей является устранение местных скачков напряжений, возникающих в точках приложения сосредоточенных нагрузок. В зубчатых колёсах неточности изготовления и монтажа могут вызвать сосредоточение нагрузки на кромках и, как следствие, повышенные напряжения изгиба и смятия. Поэтому необходимо снятие фасок или галтелей на углах зубьев (рис. 3.38, *а*). Полезно увеличивать податливость зуба путем уменьшения жёсткости обода по направлению к торцам (рис. 3.38, *б*). Действенным средством предупреждения повышенных кромочных давлений является придание зубу

бочкообразной формы (рис. 3.38, в). Этот способ обеспечивает при возможных перекосах и неточностях наиболее благоприятное расположение пятна контакта примерно в центре зуба.

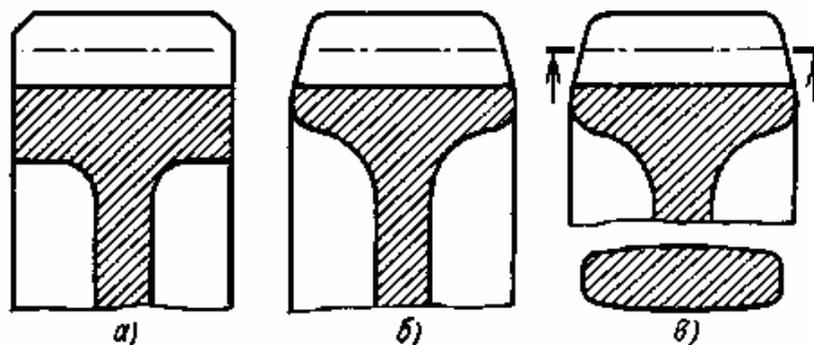


Рис. 3.38. Устранение концентрации нагрузки на краях зубьев

Повышение прочности посадок с натягом достигается уменьшением давления на посадочных поверхностях и напряжений в охватывающей и охватываемой деталях. Рациональным выбором параметров соединения (диаметра и длины посадочной поверхности, толщины стенок охватывающей и охватываемой детали) можно решить эту задачу.

Диаметр  $D$  посадочной поверхности должен быть больше диаметра вала  $D_0$  на 5...10% (рис. 3.39, а) и соединен с ним плавными галтелями  $R = (0,2...0,25) \cdot D$ . Скачки напряжений на краях соединения снижают введением на краях ступицы разгружающих фасок  $m$  (рис. 3.39, б), утонением ступицы к торцам (рис. 3.39, в), придание вала бочкообразной формы (рис. 3.39, г) или введением конических участков (рис. 3.39, д).

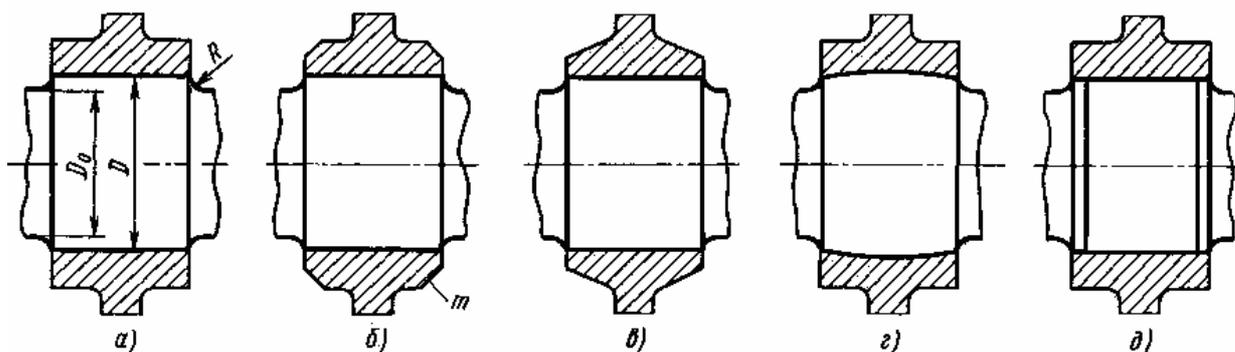


Рис. 3.39. Увеличение циклической прочности соединений с натягом

## **3.4. Жёсткость деталей и узлов**

### **3.4.1. Критерии жёсткости**

Жёсткость определяет работоспособность конструкции в такой же (а иногда и в большей) мере, как и прочность. Повышенные деформации могут нарушить нормальную работу конструкции задолго до возникновения опасных для прочности напряжений. Нарушая равномерное распределение нагрузки, они вызывают сосредоточенные силы на отдельных участках деталей, в результате чего появляются местные высокие напряжения, иногда значительно превосходящие номинальные напряжения.

Недостаточная жёсткость корпусов расстраивает взаимодействие расположенных в них механизмов, вызывая повышенное трение и износ подвижных соединений. Нежёсткость валов и опор зубчатых передач нарушает правильное зацепление колес, что приводит к быстрому износу зубьев. Нежёсткость цапф и подшипников скольжения вызывает повышенные кромочные давления, появление очагов полужидкостного и полусухого трения, перегрев, заедание или снижение срока службы подшипников. Нежёсткость неподвижных соединений, вызывает фреттинг-коррозию, наклёп и сваривание поверхностей.

У машин-орудий жёсткость рабочих органов определяет точность размеров обрабатываемых изделий. В металлорежущих станках точность обработки зависит от жёсткости станины и рабочих органов, в прокатных станах точность проката - от жёсткости рабочих клетей и валков.

Жёсткость имеет большое значение для транспортных машин, авиационной и ракетной техники. Стремясь облегчить конструкцию и максимально использовать прочностные ресурсы материалов, конструктор в данном случае повышает уровень напряжения, что сопровождается увеличением деформаций. Применение равнопрочных, наиболее выгодных

по массе конструкций, вызывает увеличение деформаций, так как равнопрочные конструкции наименее жёсткие.

Вопросы жёсткости приобретают особую актуальность в связи с появлением высокопрочных и сверхпрочных материалов, применение которых обуславливает резкое увеличение деформации конструкций.

Нередки случаи недооценки сил, действующих на конструкцию. Очень часто при расчёте получают небольшие рабочие силы, а фактически же неожиданно возникают нагрузки, приводящие к поломкам и выходу из строя деталей. Эти нагрузки могут быть вызваны неточностями монтажа, деформаций недостаточно жёстких элементов конструкции, остаточными деформациями, перетяжкой крепёжных деталей, повышенным трением и перекосами трущихся частей узла, силами, возникающими при транспортировке и установке машины, и другими факторами, не учитываемыми расчётом.

Деформации можно рассчитать лишь в простейших случаях методами сопротивления материалов и теории упругости. Часто приходится иметь дело с не рассчитываемыми деталями, сечения которых определяются условиями изготовления (например, технологией литья) или имеющими сложную конфигурацию, затрудняющую определение напряжений и перемещений.

Здесь приходится прибегать к моделированию, эксперименту, опыту имеющихся аналогичных конструкций, а нередко полагаться только на интуицию, вырабатывающуюся с течением времени у конструктора. Опытный конструктор, зная действующие силы, определяет более или менее правильно деформации, выявляет слабые места и, пользуясь различными приёмами, увеличивает жёсткость, komponуя рациональную конструкцию.

Для машиностроения можно сформулировать следующее определение: *жёсткость* - это способность системы сопротивляться действию внешних нагрузок с деформациями, допустимыми без нарушения работоспособности системы. Понятием, обратным жёсткости, является *податливость*, т.е. свойство системы приобретать относительно большие деформации под

действием внешних нагрузок. Для большинства деталей и узлов машин наибольшее значение имеет жёсткость. Однако в ряде случаев важным свойством оказывается податливость (пружины, рессоры и другие упругие элементы).

Жёсткость оценивают коэффициентом жёсткости, представляющим собой отношение силы  $F$ , приложенной к системе, к максимальной деформации  $f$ , вызываемой этой силой.

Для случая растяжения-сжатия бруса постоянного сечения в пределах упругой деформации коэффициент жёсткости согласно закону Гука

$$\lambda_{p-c} = \frac{F}{f} = \frac{\sigma \cdot A}{f} = \frac{E \cdot A}{l},$$

где  $A$  – площадь сечения бруса;  $E$  — модуль нормальной упругости;  $l$  – длина бруса в направлении действия силы.

Обратную величину

$$\nu = \frac{f}{F} = \frac{l}{E \cdot A},$$

характеризующую упругую податливость бруса, называют *коэффициентом податливости*.

Для случая кручения бруса постоянного сечения коэффициент жёсткости равен отношению приложенного к брусу крутящего момента  $M_{кр}$  к вызываемому этим моментом углу  $\varphi$  поворота сечений бруса на длине  $l$ :

$$\lambda_{кр} = \frac{M_{кр}}{\varphi} = \frac{G \cdot I_p}{l},$$

где  $I_p$  - полярный момент инерции сечения бруса.

Для случая изгиба бруса постоянного сечения коэффициент жёсткости

$$\lambda_{изг} = \frac{F}{f} = K_{изг} \frac{E \cdot I}{l^3},$$

где  $I$  – осевой момент инерции сечения бруса,  $l$  - длина бруса, мм;  $K_{изг}$  - коэффициент, зависящий от условий нагружения.

На рис. 3.40 приведены значения коэффициента жёсткости при изгибе бруса для трёх случаев нагружения. Для изгиба бруса на двух опорах,

нагруженного сосредоточенной силой  $F$  в середине пролёта, принято  $\lambda_{\text{изг}} = 1$ .

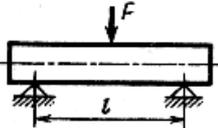
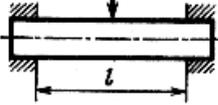
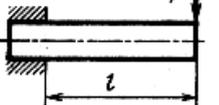
Схема нагружения	$\lambda_{\text{изг}}$	Схема нагружения	$\lambda_{\text{изг}}$	Схема нагружения	$\lambda_{\text{изг}}$
	1		4		0,063

Рис. 3.40. Коэффициенты жёсткости бруса для трёх случаев нагружения

Жёсткость системы сильно зависит от типа и расположения опор. Например, жёсткость двухопорного бруса с заделанными концами в 4 раза превышает жёсткость бруса, свободно опёртого по концам. Жёсткость консольного бруса, нагруженного сосредоточенной силой, составляет только 0,063 жёсткости двухопорного бруса той же длины, нагруженного той же силой по середине пролёта.

При заданной нагрузке и заданных линейных размерах системы жёсткость вполне определяется максимальной деформацией  $f$  (стрелой прогиба). Эту величину часто применяют для практической оценки деформируемости геометрически одинаковых систем.

### 3.4.2. Факторы, влияющие жёсткость конструкции

Жёсткость конструкций определяют следующие факторы:

- модуль упругости материала (модуль нормальной упругости  $E$  при растяжении-сжатии и изгибе, модуль сдвига  $G$  - при сдвиге и кручении);
- геометрические характеристики сечения деформируемого тела (площадь сечения  $A$  при сдвиге и растяжении-сжатии, осевой момент инерции  $I$  при изгибе, полярный момент инерции  $I_p$  при кручении);
- линейные размеры деформируемого тела (длина  $l$ );
- вид нагрузки и тип опор.

Модуль упругости является устойчивой характеристикой металлов, мало зависит от термообработки и содержания (в обычных количествах) легирующих элементов и определяется лишь полностью атомно-кристаллической решёткой основного компонента. Из технических металлов только W, Mo и Be имеют повышенный модуль упругости. Однако применение того или иного материала по большей части определяется условиями работы детали. Поэтому главным практическим средством увеличения жёсткости является маневрирование геометрическими параметрами системы.

На жёсткость сильно влияют размеры и форма сечений. В случае растяжения-сжатия жёсткость пропорциональна квадрату, а при изгибе - четвертой степени размеров сечения (в направлении действия изгибающего момента).

Влияние линейных размеров детали невелико для случая растяжения-сжатия (жёсткость обратно пропорциональна первой степени длины) и очень значительна при изгибе (жёсткость обратно пропорциональна третьей степени длины).

Наиболее простой способ уменьшения деформаций заключается в снижении уровня напряжений. Однако этот путь нерационален, так как он сопряжён с увеличением массы конструкции. В случае изгиба оптимальным способом уменьшения деформаций является выбор рациональной формы сечений, условий нагружения, типа и расстановки опор. Поскольку влияние линейных параметров системы при изгибе велико, то в данном случае имеются эффективные способы увеличения жёсткости, позволяющие уменьшить деформации системы в десятки раз по сравнению с исходной конструкцией, а иногда практически полностью исключить изгиб.

В случае кручения эффективными средствами повышения жёсткости являются уменьшение длины детали на участке кручения и, особенно, увеличение диаметра, так как полярный момент инерции возрастает пропорционально четвертой степени диаметра.

В случае растяжения-сжатия возможность увеличения жёсткости гораздо меньше, так как форма сечения не играет никакой роли, а деформации зависят только от площади сечения, которая определяется условием прочности. Единственным способом повышения жёсткости здесь является уменьшение длины детали. Если же длина задана, то остаётся только переход на материалы с более высоким модулем упругости.

Деформация зависит не только от максимального действующего напряжения в опасном сечении детали, но и от закона распределения напряжений по всем остальным сечениям, т. е. от формы детали по ее длине. Равнопрочные детали, у которых максимальные напряжения во всех сечениях одинаковы, обладают наименьшей жёсткостью.

### **3.4.3. Удельные показатели жёсткости**

При сравнении жёсткости, прочности и массы деталей, изготовленных из различных материалов, различают четыре основных случая.

1. Детали *одинаковой конфигурации и размеров* (при равной нагрузке имеют одинаковые напряжения).
2. Детали *равной жёсткости* (имеют одинаковые деформации при различных сечениях и напряжениях).
3. Детали *равной прочности* (имеют одинаковый запас прочности, различные сечения и напряжения, пропорциональные пределу прочности материала).
4. Детали *одинаковой массы*.

Первый случай, который соответствует замене материала детали другим без изменения её геометрических размеров, на практике встречается, когда сечения детали заданы технологическим процессом (например, литые корпусные детали).

Второй и третий случай имеют место при замене материала детали другим с одновременным изменением её сечений (детали, в которых

напряжения и деформации определяются достаточно точно и назначаются с расчётом максимального использования прочности и жёсткости материала).

В четвёртом случае масса конструкции задана её функциональным назначением и условиями эксплуатации.

При сравнении прочностных, массовых и жёсткостных показателей деталей, изготовленных из различных материалов, будем предполагать, что длина деталей одинакова, а сечения в последних трех случаях изменяются геометрически подобно.

#### **Детали одинаковой конфигурации ( $\sigma = \text{const} = C_\sigma$ ).**

В случае растяжения-сжатия коэффициент жёсткости согласно закону Гука определяется по формуле

$$\lambda_{p-c} = \frac{F}{f} = \frac{\sigma \cdot A}{f} = \frac{E \cdot A}{l},$$

где  $A$  – площадь сечения бруса;  $E$  — модуль нормальной упругости;  $l$  – длина бруса в направлении действия силы.

По условию  $A = \text{const}$  и  $l = \text{const}$ . Следовательно, жёсткость деталей в данном случае зависит только от модуля упругости.

Запас прочности  $S$  определяется

$$S = \sigma_b / \sigma,$$

где  $\sigma_b$  — предел прочности на растяжение;  $\sigma$  — действующее в детали напряжение.

По условию  $\sigma = \text{const} = C_\sigma$ . Поэтому

$$S = \sigma_b / C_\sigma.$$

Тогда масса детали

$$m = \rho \cdot F \cdot l = \rho \cdot C_\sigma,$$

где  $\rho$  - плотность материала.

Совершенно аналогичны соотношения в случае изгиба и кручения, с той лишь разницей, что при кручении жёсткость деталей определяется модулем сдвига  $G$ .

### Детали одинаковой жёсткости ( $\lambda = \text{const} = C_\lambda$ ).

Условие равножёсткости в случае растяжения-сжатия имеет вид

$$\lambda_{p-c} = \frac{P}{f} = \frac{\sigma F}{f} = \frac{EF}{l} = C_\lambda.$$

Тогда площадь будет равна  $A = C_\lambda / E$

Масса деталей равной жёсткости  $m = \rho \cdot A \cdot l = C_\lambda \cdot \rho / E$ .

Напряжения  $\sigma = C_\lambda / A = C_\lambda \cdot E$

Запас прочности  $S = \sigma_B / \sigma = C_\lambda \cdot \sigma_B / E$ .

При изгибе масса деталей равной жёсткости и запас прочности равны

$$m = C_\lambda \cdot \rho / E^{1/2}; \quad S = C_\lambda \cdot \sigma_B / E^{3/4}.$$

### Детали равной прочности ( $S = \text{const} = C_S$ ).

Условие равнопрочности при растяжении-сжатии

$$S = \sigma_B / \sigma = C_S.$$

Ввиду того, что  $\sigma = C_S / A$ ,  $S = C_S$ ,  $\sigma_B \cdot A = C_S$ , то для равнопрочных деталей  $A = C_S / \sigma_B$  и масса  $m = \rho \cdot F \cdot l = C_S \cdot \rho / \sigma_B$ .

Коэффициент жёсткости с учетом формулы  $A = C_S / \sigma_B$  будет равен

$$\lambda_{p-c} = EA = C_S \cdot E / \sigma_B.$$

При изгибе  $m = C_S \cdot \frac{\rho}{\sigma_B^{2/3}}$ ,  $\lambda_{\text{изг}} = C_S \cdot \frac{E}{\sigma_B^{4/3}}$ .

### Детали равной массы ( $m = \text{const} = C_m$ ).

При растяжении-сжатии условие равной массы

$$m = \rho A l = C_m.$$

Следовательно, площадь  $A = 1 / \rho$

Напряжения  $\sigma = C_m / A = C_m \cdot \rho$ .

Запас прочности  $S = \sigma_B / \sigma = C_m \cdot \sigma_B / \rho$

Коэффициент жёсткости  $\lambda = EA = C_m \cdot E / \rho$ .

При изгибе  $S = C_m \cdot \sigma_B / \rho^{3/2}$ ,  $\lambda = C_m \cdot E / \rho^2$ .

Для сравнительных целей пользуются наиболее простыми формулами для растяжения-сжатия. Показатели массы, жёсткости и прочности при

растяжении-сжатии для разобранных выше случаев приведены в табл. 3.4. Значения удельной прочности  $S/m = \sigma_{0,2}/\rho$  и удельной жёсткости  $\lambda/m = E/\rho$  одинаковы для всех категорий деталей.

Таблица 3.4

Характеристики массы, прочности и жёсткости деталей

Детали	Масса $m$	Прочность $S$	Жёсткость $\lambda$
Одинаковой конфигурации	$\rho$	$\sigma_{0,2}$	$E$
Равной жёсткости	$\rho/E$	$\sigma_{0,2}/E$	$C_\lambda$
Равной прочности	$\rho/\sigma_{0,2}$	$C_S$	$E/\sigma_{0,2}$
Равной массы	$C_m$	$\sigma_{0,2}/\rho$	$E/\rho$

### 3.4.4. Способы повышения жёсткости при конструировании

Можно назвать следующие способы повышения жёсткости конструкции без существенного увеличения массы:

- устранение изгиба, замена его растяжением или сжатием;
- для деталей, работающих на изгиб, необходима рациональная установка опор и исключение невыгодных по жёсткости видов нагружения;
- увеличение моментов инерции сечений деталей, не сопровождающееся возрастанием массы;
- усиление рёбрами, работающими предпочтительно на сжатие;
- усиление участков перехода от одного сечения к другому;
- блокирование деформаций введением соответствующих связей;
- привлечение жёсткости смежных деталей;
- для деталей коробчатого типа целесообразно применение сводчатых, сферических, яйцевидных и других подобных форм;
- дисковым деталям необходимо придавать конические, чашечные, сферические формы, применять оребрение и гофрирование;

- для деталей типа плит необходимо применение коробчатых, ячеистых и сотовых конструкций.

### **Замена изгиба растяжением или сжатием.**

Повышенная жёсткость деталей, работающих на растяжение-сжатие, обусловлена лучшим использованием материала при этом виде нагружения. В случае изгиба и кручения нагружены преимущественно крайние волокна сечения. Предельное состояние наступает, когда напряжения в них достигают опасных значений, в то время как сердцевина остается недогруженной. При растяжении-сжатии напряжения одинаковы по сечению и материал используется полностью. Предел наступает, когда напряжение во всех точках теоретически одновременно достигает опасного значения и в этом случае деформации детали пропорциональны первой степени её длины. В случае же изгиба действие нагрузки зависит от расстояния между плоскостью действия изгибающей силы и опасным сечением, деформации здесь пропорциональны третьей степени этого расстояния.

Сравним консольную балку круглого сечения ( $d = 20$  мм), нагруженную изгибающей силой  $F$  (табл. 3.5, *а*), и ферму треугольной формы с одинаковым вылетом  $l$ , составленную из стержней того же диаметра (рис. 3.41). Верхний стержень  $1$  под действием силы  $F$  работает на растяжение, нижний  $2$  - на сжатие. При соотношениях, показанных на рисунке, максимальное напряжение изгиба в консольной балке в 550 раз больше напряжений растяжения-сжатия в стержнях фермы, а максимальная деформация (в точке приложения силы  $F$ ) в 9000 раз.

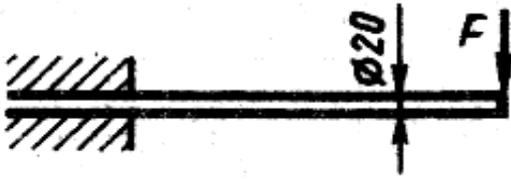
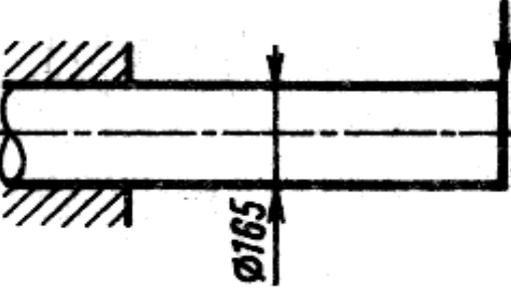
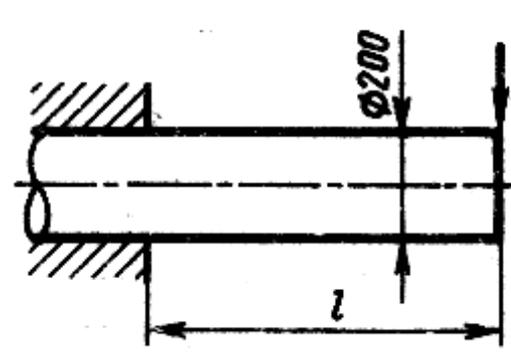
Для того чтобы сделать системы *равнопрочными*, необходимо увеличить диаметр балки до 165 мм (табл. 3.5, *б*). При этом масса балки (без учета заделки) становится в 25 раз больше массы фермы, а максимальный прогиб оказывается в 2 раза больше прогиба фермы.

Для достижения *одинаковой жёсткости* (равенство максимальных прогибов) необходимо увеличить диаметр балки до 200 мм (табл. 3.5, *в*).

Напряжения снижаются, составляя 0,6 от напряжения в стержнях фермы. Однако масса балки будет в 35 раз больше массы фермы.

Таблица 3.5

Сравнение жёсткости, прочности и массы консольных балок с фермой

Схема консольной балки		Относительные величины		
		прогиба	напряжения	массы
		$f_B/f_\Phi$	$\sigma_B/\sigma_\Phi$	$m_B/m_\Phi$
a)		9000	550	0,35
б)		2	1	25
в)		1	0,6	35

Связь между прогибом  $f_\Phi$  ферменной системы при одинаковых сечениях можно выразить соотношением

$$f_B/f_\Phi \approx 10,5 (l/d)^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha,$$

где  $l$  - длина вылета;  $d$  – диаметр балки и стержней фермы;  $\alpha$  – половина угла при вершине ферменного треугольника.

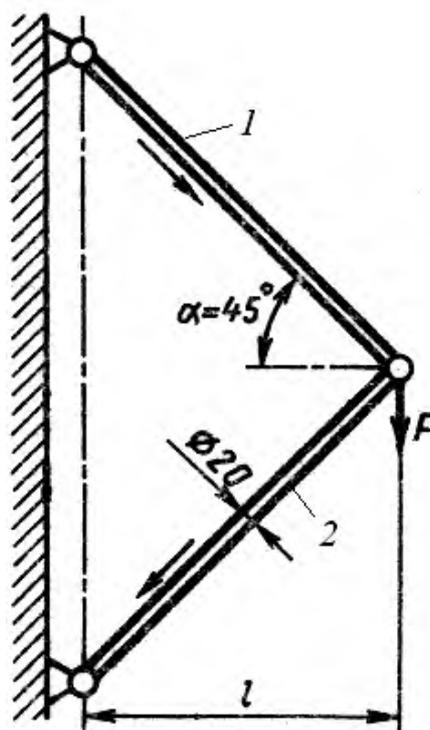


Рис. 3.40. Схема треугольной фермы

Отношение  $f_B/f_\Phi$  в функции угла  $\alpha$  для различных значений  $l/d$  приведено на рис. 3.42, а. При одинаковых сечениях прогиб консольной балки может быть в сотни и тысячи раз больше прогиба ферменной системы. Разница резко возрастает с увеличением отношения  $l/d$ , т.е. с уменьшением  $f_B/f_\Phi$ . Однако и для наиболее толстых стержней ( $l/d = 10$ ) разница в пользу ферменной системы весьма велика.

Отношение  $f_B/f_\Phi$  достигает максимальных значений при  $\alpha = 45 \dots 60^\circ$ . В этом диапазоне ферма, приведенная на рис. 3.40, обладает наибольшей жёсткостью. Напряжения (рис. 3.42, б) в балке во много раз больше напряжений в стержнях фермы. Например, при  $\alpha = 45^\circ$  в 100-1000 раз.

В качестве примера практического использования приведенных выше рассуждений рассмотрим конструкцию литого кронштейна, в котором балочный кронштейн подвергается изгибу (рис. 3.43, а). Конструкция становится более прочной и жёсткой, если кронштейн выполнить в виде треугольной фигуры (рис. 3.43, б).

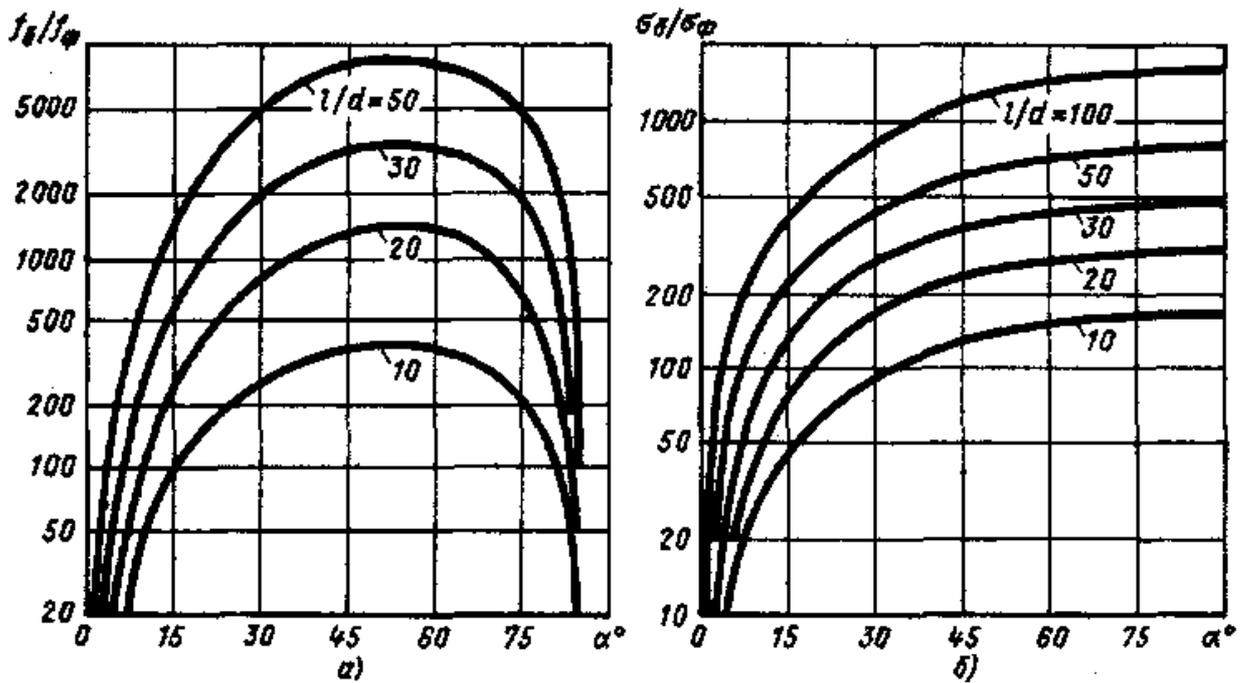


Рис. 3.42. Сравнительные характеристики консольной балки и треугольной фермы по относительным величинам прогиба (а) и напряжения (б)

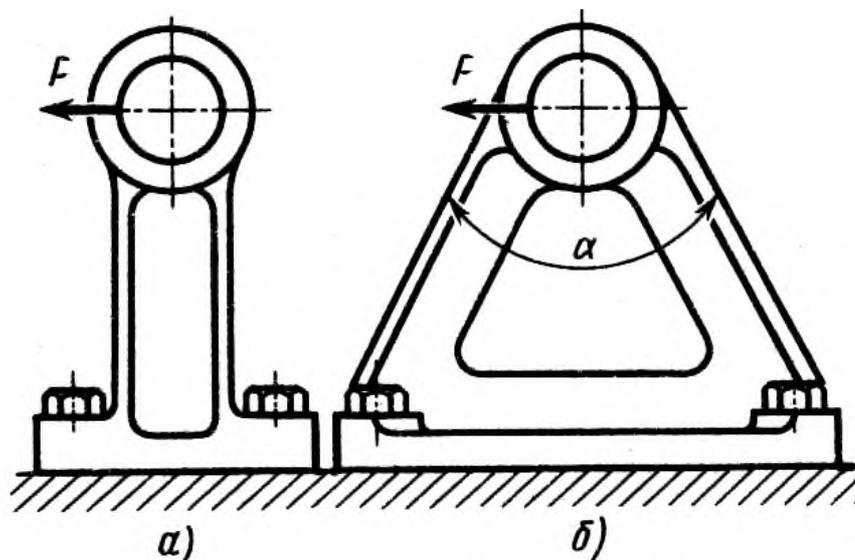


Рис. 3.43. Конструкции литого кронштейна, работающего на изгиб (а) и растяжение-сжатие (б)

Пример устранения изгиба показан также на рис. 3.44. Здесь двухопорная балка, нагруженная посередине сосредоточенной силой  $F$ , подвергается изгибу (рис. 3.44, а). Её можно заменить более выгодной стержневой системой (рис. 3.44, б), наклонные стержни которой работают на

сжатие, а горизонтальный – на растяжение. Близка к этому случаю арочная балка (рис. 3.44, в), работающая преимущественно на сжатие.

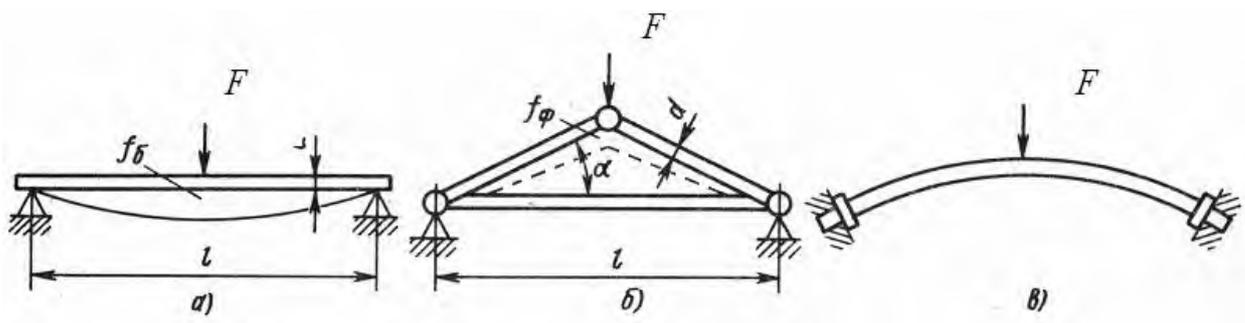


Рис. 3.44. Схема устранения напряжений изгиба:

*a* - свободно опёртая балка; *б* – свободно опёртая стержневая система;

*в* – арочная балка

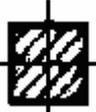
### Рациональные сечения.

Для повышения жёсткости без увеличения массы деталей необходимо усиливать участки сечений, подвергающихся при данном виде нагружения наиболее высоким напряжениям, и удалять ненагруженные и малонагруженные участки. При изгибе напряжены сечения, наиболее удалённые от нейтральной оси. При кручении напряжены внешние волокна, по направлению к центру напряжения уменьшаются, и в центре они равны нулю. Следовательно, целесообразно всемерно развивать наружные размеры, сосредотачивая материал на периферии и удаляя его из центра.

Наибольшей жёсткостью и прочностью при наименьшей массе обладают развитые по периферии полые тонкостенные детали типа коробок, труб и оболочек.

В табл. 3.6 приведено сравнение показателей различных профилей при изгибе. В основу сравнения положены условия равенства масс (площадей сечений  $A$ ) и прочности (моментов сопротивления  $W$ ). Увеличение прочности и жёсткости достигается последовательным применением принципа разнеса материала в область действия наибольших напряжений. За единицу приняты масса, моменты сопротивления и инерции исходного профиля  $I$ , у которого материал сосредоточен вблизи нейтральной оси.

## Прочность, жёсткость и масса профилей

Поперечное сечение балки		A = const			W = const		
		<i>m</i>	<i>W</i>	<i>I</i>	<i>m</i>	<i>W</i>	<i>I</i>
1		1	1	1	1	1	1
2		1	2,2	5	0,6	1	1,7
3		1	5	25	0,33	1	3
4		1	9	40	0,2	1	3
5		1	12	70	0,12	1	3,5

Придание наиболее целесообразной формы профилям одинаковой массы увеличивает их прочность в 9...12 раз, а жёсткость — в 40..70 раз по сравнению с исходным профилем. Для профилей, одинаковых с исходным профилем прочности, придание двутавровой формы снижает массу до 0,2...0,12 и повышает жёсткость в 3...3,5 раза по сравнению с исходным профилем.

**Рациональное расположение опор.**

Так как прогиб двухопорной балки пропорционален третьей степени длины пролёта, то сближение опор является весьма эффективным средством повышения жёсткости. На рис. 3.45, *a* показана двухопорная установка зубчатого колеса. При диаметре вала 40 мм, длине 200 мм и нагрузке 10 кН

прогиб вала в конструкции *a* относительно большой ( $\approx 0,1$  мм), влияющий на работу зубчатых колёс.

Если расстояние между опорами сократить, например в 3 раза (рис. 3.45, б), то максимальный изгибающий момент и напряжения в вале уменьшаются также в 3 раза, а максимальный прогиб – в 27 раз. В связи уменьшением пролёта, а также с увеличением момента инерции работающего участка вала под зубчатым колесом прогиб становится пренебрежимо малым.

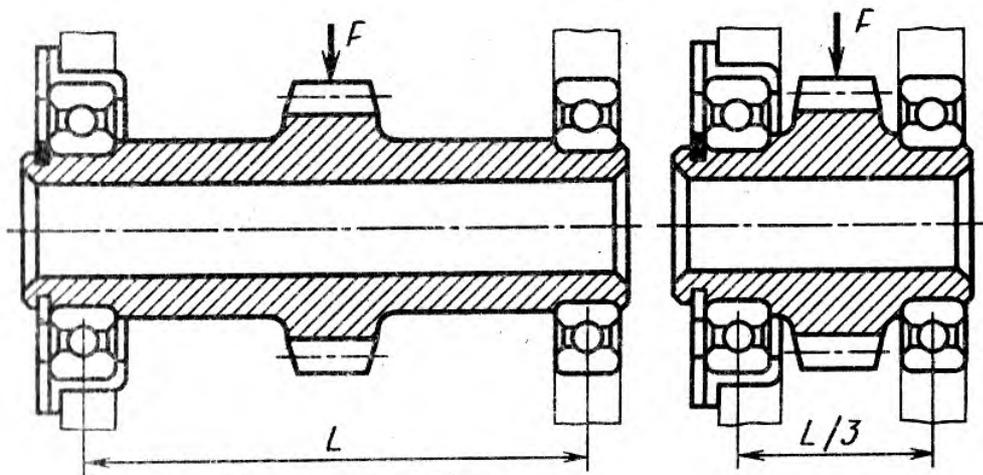


Рис. 3.45. Уменьшение пролета между опорами

### Блокирование деформаций.

Задача увеличения жёсткости заключается в том, чтобы найти точки наибольших перемещений системы, деформируемой под действием нагрузки, и предотвратить эти перемещения введением элементов растяжения – сжатия, расположенных по направлению перемещений.

Классическим примером решения этой задачи является увеличение жёсткости рам и ферменных конструкций раскосами. Жёсткость стержневой рамы, подвергающейся действию сдвигающих сил  $F$  (рис. 3.46, *a*), крайне незначительна и определяется только сопротивлением вертикальных стержней изгибу и жёсткостью узлов соединения стержней. Введение косынок (рис. 3.46, *б*) приближает схему нагружения стержней к схеме работы заделанных балок и несколько уменьшает деформации.

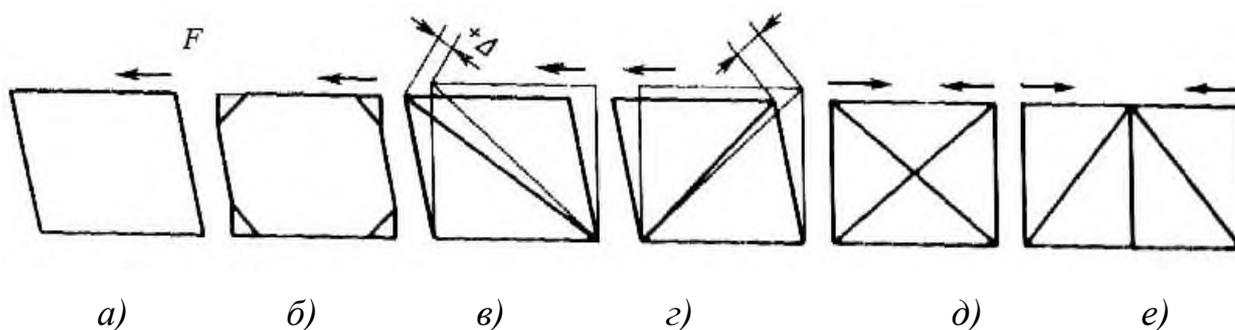


Рис. 3.46. Схемы действия диагональных связей

Наиболее эффективно введение *диагональных связей* (раскосов), подвергающихся растяжению или сжатию. Раскос растяжения (рис. 3.46, в) должен при перекосе рамы удлиниться на величину  $\Delta$ . Так как жёсткость растягиваемого стержня во много раз больше изгибной жёсткости вертикальных стержней, то общая жёсткость системы резко возрастает. Аналогично действует раскос сжатия (рис. 3.46, г). Но в этом случае необходимо считаться с возможностью продольного изгиба сжатого стержня, что делает систему менее желательной.

Если нагрузка действует попеременно в обоих направлениях, то применяют раскосы перекрёстные (рис. 3.46, д) или чередующегося направления (рис. 3.4, е).

На рис. 3.47, а показана схема деформации стенок цилиндрического резервуара, подвергающегося действию внутреннего давления. Участки наибольших деформаций целесообразно связать элементами, работающими на растяжение: обечайку – кольцом 1, днища – болтом 2 (рис. 3.47, б).

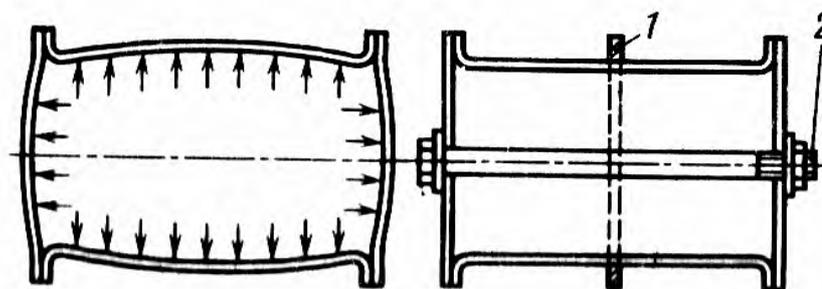


Рис. 3.47 – Блокирование деформаций стенок цилиндрического резервуара элементами, работающими на растяжение

### 3.5. Патентно-правовые показатели

Ценную основу конструкторского проекта представляет интеллектуальная собственность разработчика, предприятия, которая может продаваться и покупаться, а также вороваться. Интеллектуальная собственность – это мысли, идеи, воплощенные в проекте машины. В этой связи особое значение приобретает патентная способность и патентная чистота, воплощенные в технических решениях при разработке проекта машины.

*Патентная чистота* предусматривает наличие в проекте только своей официально признанной интеллектуальной собственности или законно приобретенного права на использование чужой собственности путем закупки лицензий. Закупка лицензий ускоряет технический прогресс и повышает эффективность общественного производства в тех областях науки и техники, уровень развития которых ниже уровня, достигнутого в других странах.

Во многих странах мира защищаются патентами, свидетельствами следующие виды интеллектуальной деятельности: открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, полезные модели.

*Открытие* - установление ранее неизвестных объективных закономерностей, свойств и явлений материального мира с обязательным экспериментальным подтверждением. Открытие, в основном, является продуктом научной деятельности, но решающим и революционным образом определяет развитие техники. На открытие существует приоритет (право первенства), но нет права собственности на использование.

*Изобретение* - новое и обладающее существенными отличиями техническое решение задачи, которое не является очевидным следствием известных решений. Изобретение относится к объектам интеллектуальной собственности, и на него распространяется авторское право (монопольное право собственности на использование). Изобретателю выдается патент, свидетельствующий о его праве и приоритете в изобретении (ранее в нашей

стране вместо патента выдавали авторское свидетельство). Авторское право может быть уступлено (продано). Изобретение может быть использовано в коммерческих целях только с разрешения патентообладателя на основе лицензионного договора.

*Промышленный образец* – новое промышленное решение изделия, например, новая модель машины, прибора, механического приспособления.

*Товарный знак* – оригинально оформленный отличительный знак с каким-нибудь условным изображением, помещаемый фирмой или предприятием-изготовителем на изделии для его индивидуализации, например, значок на радиаторе автомобиля.

*Полезная модель* – это, как правило, конструктивное решение какого-либо изделия, не обладающее существенной новизной как изобретение, но имеющее оригинальную конструкцию, схему, решение.

*Рационализаторское предложение* - предложение по улучшению конструкции реального изделия или процесса его изготовления, не содержащее новых существенных решений (с недостаточно существенными отличиями). Часто такое предложение проявляется в применении неизвестного на данном предприятии решения, известного в других местах (но следует, быть осторожным с возможным нарушением авторских прав). Понятие рацпредложения существует всего в нескольких странах как способ поощрения изобретательства и вовлечения, в него широкого круга работников предприятия.

*Ноу-хау* – от англ. «know-how», т.е. знаю, как сделать. Под этим термином обычно подразумевают техническую, организационную или коммерческую информацию, составляющую секрет любого производства и имеющую коммерческую ценность (ноу-хау не относится к государственным секретам). В отличие от патента на изобретение, на ноу-хау существует только право на защиту имущественных интересов в случае их незаконного получения и использования (например, промышленный шпионаж).

*Патентоспособность* характеризует наличие в проекте решений, которые могут быть признаны официально объектами интеллектуальной собственности, на которые имеются патенты на изобретения, на полезные модели. Выявление патентоспособности и патентной чистоты осуществляется при патентной экспертизе.

Патентно-чистой разрабатываемая конструкция может быть в следующих вариантах:

1) все технические решения (общая схема, конструкции составных частей, материалы и т.д.) оговорены в патентах, срок действия которых уже истек, или являются общеизвестными и не подлежащими патентованию – это наиболее распространенный и самый простой вариант, но он не позволяет создать конкурентоспособную машину;

2) все технические решения запатентованы разработчиком и производителем машин - это наиболее предпочтительный вариант, но требует больших интеллектуальных затрат;

3) все технические решения выполнены в соответствии с лицензиями иных патентообладателей – такой вариант сопряжен с наибольшими первоначальными затратами средств, но может сократить время, затрачиваемое на разработку проекта;

4) сочетание в разной пропорции всех трех вариантов.

Проектирование, в отличие от многих других видов творчества, не является пассивным ожиданием озарения. Оно требует активного участия в процессе создания конкретного объекта (устройства), поиска и выбора путей решения поставленной задачи.

## 4. КОНСТРУИРОВАНИЕ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ

### 4.1. Технологичность конструкции

*Технологичность конструкции* машины - это возможность изготовления её деталей, сборки узлов и механизмов с наименьшими трудовыми затратами при рациональном расходовании материала. Технологичность оценивается удельной трудоемкостью производства, характеризуемой отношением затрат времени в нормо-часах на изготовление машины к основному параметру машины.

Технологичность характеризуется следующими показателями:

1) *Соответствие конструктивных форм детали условиям технологии их изготовления.*

Например: при изготовлении литых деталей необходимо предусмотреть литейные уклоны; сварных деталей - удобство и даже возможность выполнения сварных работ; при механической обработке - создание удобных баз для установки и мест крепления изделия на станке, обеспечение доступа к обрабатываемым поверхностям режущего и измерительного инструментов, уменьшение размеров обрабатываемой поверхности; создание форм, удобных для обработки поверхностей, минимизацию количества установок при обработки детали.

2) *Экономичность расходования материалов.*

Минимальный расход материалов, особенно легированных сталей, цветных металлов, достигается выбором рациональных сечений, применением тонкостенных конструкций, окон и выемок в ненагруженных частях детали, введением рёбер жёсткости. Иначе рациональность конструкции обеспечивается равнопрочностью всех конструктивных элементов детали. Каждая частица детали должна работать. Следует, где возможно, применять пластмассу и композитные материалы, вместо стали - более дешёвый чугун, составные сборные конструкции деталей, например,

трубчатые и сплошные конструкции валов, венец червячного колеса бронзовый, а ступица - чугунная.

*3) Обоснованность применения элементов оборудования.*

Следует проанализировать необходимость использования каждого механизма, сложного устройства, сложных деталей и деталей, без которых, на первый взгляд, можно обойтись. Должна быть обоснована необходимость каждой выточки, уступа на детали и т.п. Этот показатель для опытного конструктора очевиден и приводится лишь как напоминание студентам.

*4) Обоснованность назначения допусков, отклонений, посадок и шероховатостей.*

При выборе значений указанных параметров обычно исходят из условий работы деталей и соединений, а также технических и экономических соображений. Увеличение точности изготовления деталей и повышение чистоты обработки поверхностей повышает стоимость их изготовления.

*5) Технологичность сборочно-разборочных операций.*

Удобство сборки и регулирования обеспечивается доступностью ко всем собираемым деталям, доступностью инструмента к крепежным деталям, возможностью необходимых измерений. Для установки и выверки деталей предусматриваются окна, люки и специальные приспособления. Для удобства разборки предусматривается возможность съёма деталей с учетом возможности их «прикипания» в процессе эксплуатации (подшипников, шкивов, зубчатых колёс и т.п.), а также рациональные соединения, например посадка тяжёлых деталей на конус и т.п. Для снижения объёма пригоночных операций при сборке применяют компенсирующие устройства (подкладки, прокладки, пружины) и предусматривают уменьшение площади поверхностей, по которым производится пригонка.

Технологичность конструкции заключается в возможности её выпуска (проектирования, изготовления и сборки с заданным уровнем качества) с наименьшими производственными затратами и в кратчайшие сроки.

Технологичность базируется на выполнении следующих условий:

- разработка конструкции с одновременным учётом конкретных производственных возможностей, т.е. ответить на два основных вопроса – 1) кто будет изготавливать и собирать спроектированное изделие, 2) где и на каком оборудовании;

- выбор материала не только из функциональных требований к изготавливаемой из него детали, но из условия его обрабатываемости с учетом твёрдости, прочности, точности, качества поверхности и отсутствия побочных эффектов (коробления, коррозии, старения и т.д.);

- назначение форм поверхностей деталей, максимально приближенных к формам готового проката или учитывающих особенности получения заготовки (уклоны, переходы, галтели, припуски и т.п.);

- обоснование назначения степени точности и чистоты поверхности, взаимозаменяемости, согласование параметров точности и шероховатости поверхностей, отклонения их формы и расположения;

- использование параметрической стандартизации и унификации;

- обеспечение удобства базирования деталей при обработке, совмещение при простановке размеров конструктивной, технологической и измерительной баз;

- простановка размеров с учетом особенности обработки детали на конкретном оборудовании, используемого инструмента и определенной последовательности операций;

- конструирование деталей простых форм поверхностей;

- обеспечение подвода и отвода инструмента при обработке каждой поверхности;

- возможность одновременной обработки нескольких деталей;

- обеспечение удобства захвата и транспортировки деталей и узлов;

- обеспечение минимальных затрат на подгонку и регулировку.

## 4.2. Устранение подгонки

Необходимо избегать установки и подгонки узлов и деталей по месту. Подгонка, особенно сопровождаемая операциями слесарной и станочной обработки, снижает производительность сборки и лишает конструкцию взаимозаменяемости.

Пример установки по месту приведен на рис. 4.1 зубчатое колесо устанавливают на вал по входящей с ним в зацепление шестерне (не показана), после чего его положение фиксируют стопорным винтом (рис. 4.1, *а*) или штифтом (рис. 4.1, *б*). При этом требуется обработка отверстий по месту дрелями и ручными развертками, при этом неизбежно попадание стружки в корпус агрегата. После чего агрегат приходится разбирать, промывать и снова собирать. Разметка при сборке с последующей обработкой на станочную обработку ещё более усложняет сборку. Более технологична фиксация зубчатого колеса кольцевыми стопорами, устанавливаемыми в заранее проделанные канавки на валу (рис. 4.1, *в*).

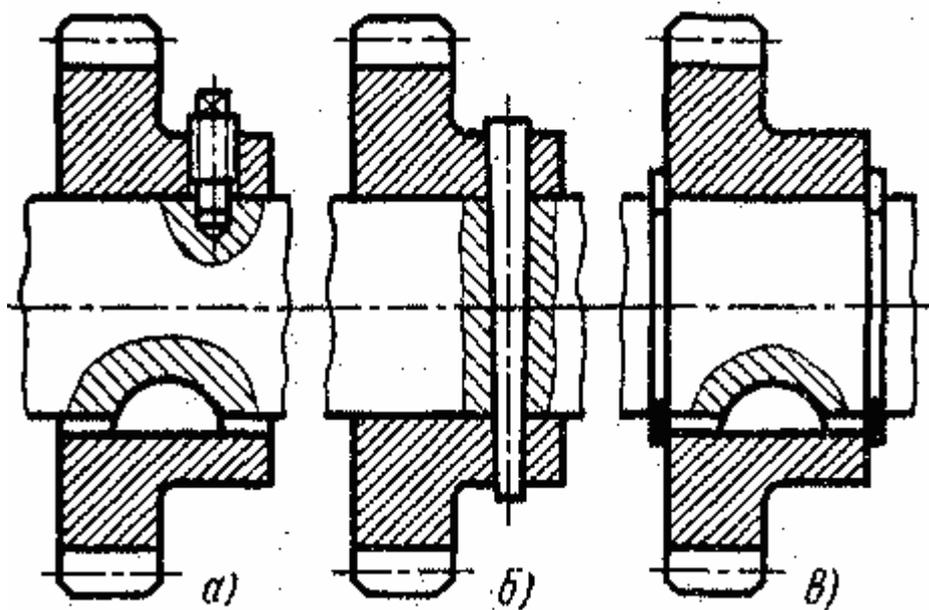


Рис. 4.1. Устранение подгонки при установке зубчатого колеса на вал

При установке подшипника в корпусе по месту (рис. 4.2, *а*) однажды найденное правильное положение втулки сбивается при каждой разборке, вследствие чего требуется новая регулировка. Фиксация подшипника контрольными штифтами (рис. 4.2, *б*) требует механической обработки при сборке. Правильное решение - центрирование подшипника по отверстию в корпусе (рис. 4.2, *в*), заранее выполненному с точностью, обеспечивающей правильную работу механизма.

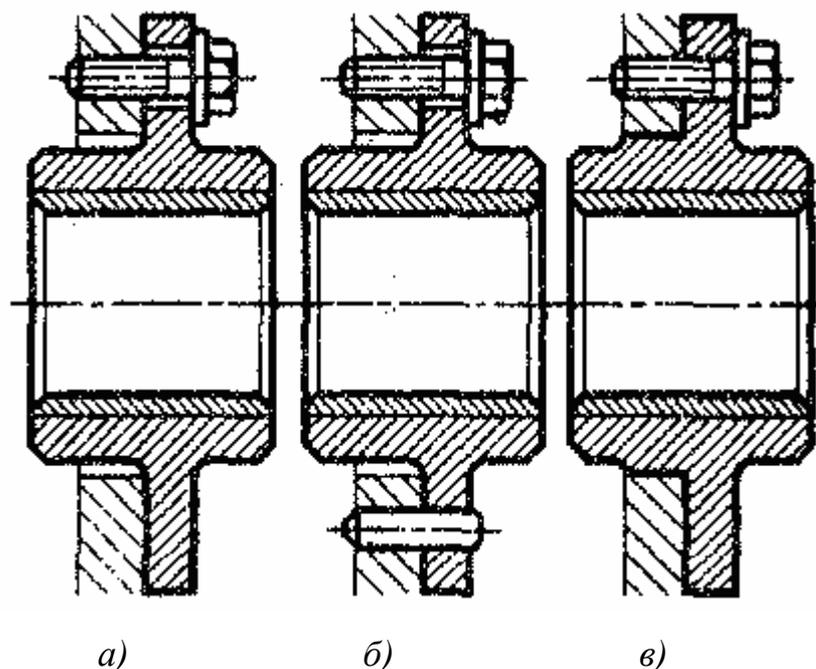


Рис. 4.2. Устранение подгонки при установке подшипника в корпус

Установка прямолинейной направляющей на станине (рис. 4.3, *а*) требует выверки направляющей по месту и сверления отверстий под крепежные винты. Направляющая не застрахована от сдвига в пределах зазора между крепежными винтами и отверстиями. Фиксация контрольными штифтами (рис. 4.3, *б*) требует сверления и развертывания отверстий под контрольные штифты совместно с направляющей и станине. В рациональной конструкции (рис. 4.3, *в*) направляющая установлена в паз, выполненный в станине.

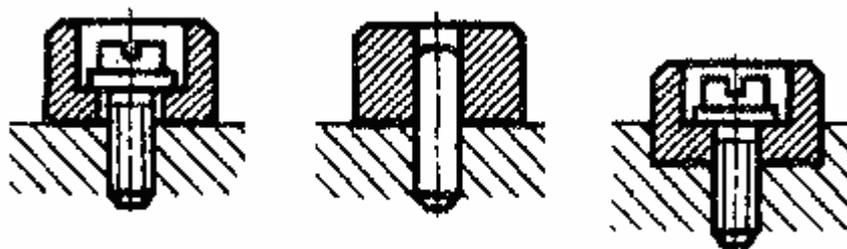


Рис. 4.3. Устранение подгонки при установке направляющей на станине

### 4.3 Устранение и уменьшение изгиба

Во всех случаях, когда допускает конструкция, изгиб следует заменять более выгодными видами деформации - растяжением, сжатием или сдвигом. Целесообразно применение стержневых или близких к ним систем, элементы которых работают преимущественно на растяжение-сжатие. Если изгибное нагружение неизбежно, то следует уменьшать плечо изгибающих сил и увеличивать моменты сопротивления на опасных участках. Особенно это важно при консольном нагружении, наиболее невыгодном по прочности и жёсткости.

На рис. 4.4 приведен пример практически полного устранения изгиба.

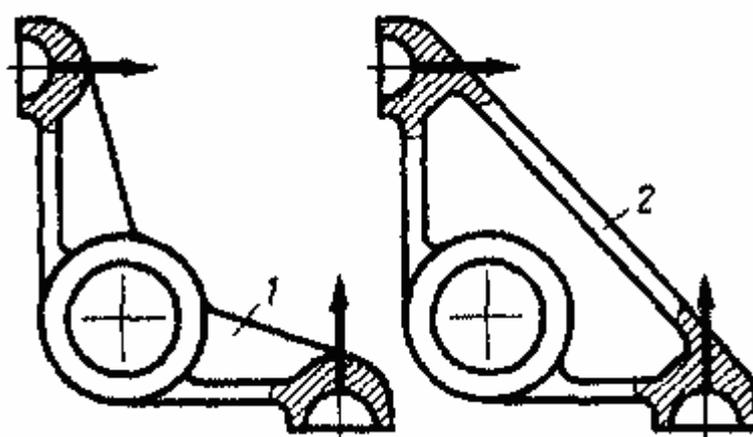


Рис. 4.4. Устранение изгиба в плечах углового рычага

Плечи углового рычага (конструкция 1) испытывают изгиб от действия сил, приложенных на крайних точках. Введение таврового ребра между концами рычага (конструкция 2) ликвидирует изгиб.

В узле установки, лапа для крепления ролика на станине подвергается изгибу (рис 4.5, а). Несколько лучше конструкция с усиливающими рёбрами (рис 4.5, б). Наиболее рационально установить ролик непосредственно под стенкой станины, работающей в данном случае на сжатие (рис 4.5, в).

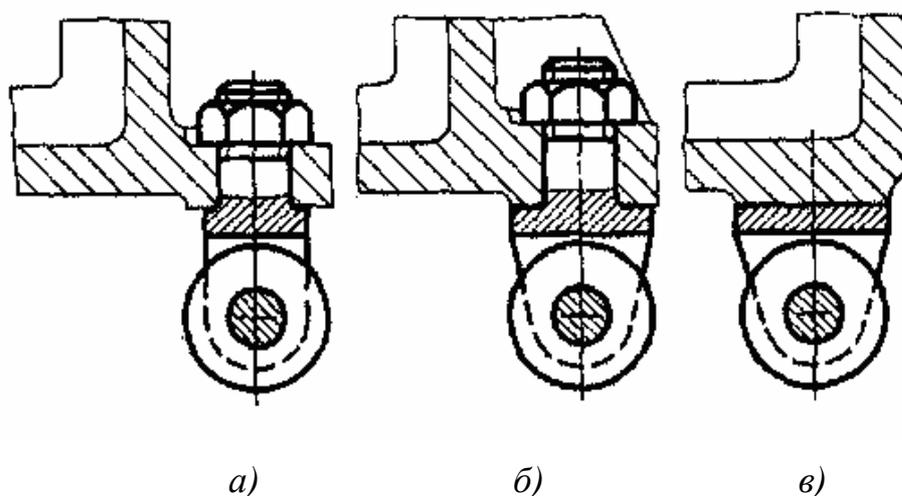


Рис. 4.5. Устранение изгиба лапы для крепления ролика на станине

В конструкции шарикового подпятника (рис. 4.6.а) опорная кольцевая полка подвергается изгибу под действием рабочей нагрузки. В улучшенной конструкции полка усилена рёбрами (рис. 4.6, б). В наиболее рациональной конструкции (рис. 4.6, в) сила передается непосредственно на стенки корпуса, работающие на сжатие.

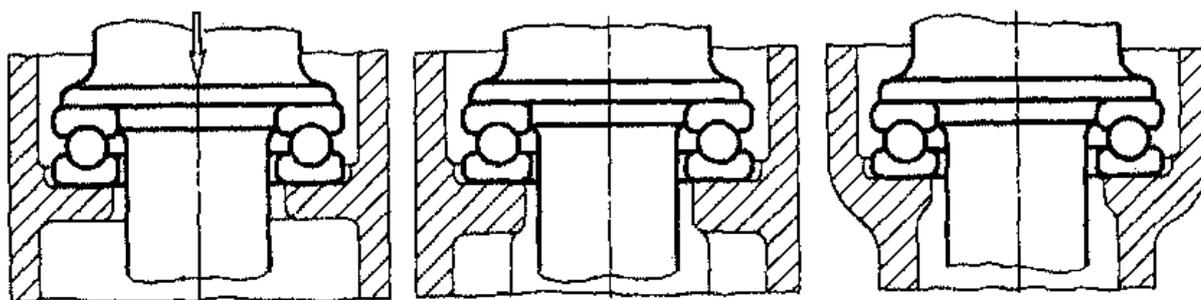


Рис. 4.6. Устранение изгиба опорной кольцевой полки в конструкции шарикового подпятника

Конструкция (рис. 4.7, а) привода роликового толкателя неудачна. Направляющая втулка толкателя, выполненная в виде консоли, подвергается сильному изгибу действием приводного кулачка. Крепление конца втулки в станине устраняет изгиб (рис. 4.7, б).

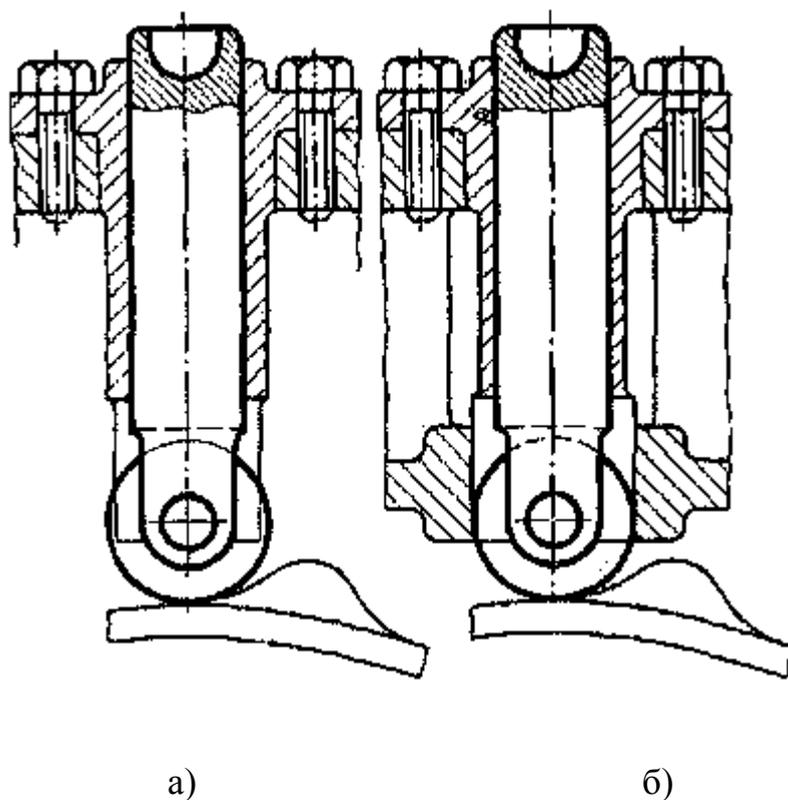


Рис. 4.7. Устранение изгиба втулки толкателя

На рис. 4.8 рассмотрены приёмы последовательного повышения прочности фланцевого соединения, нагруженного растягивающими силами. Исходная конструкция, представленная на рис. 4.8, а нерациональна вследствие большого вылета крепёжных болтов относительно стенок соединяемых деталей. Уменьшение вылета до предела, допускаемого условием размещения головок болта, а также условиями обработки опорных поверхностей под головки (рис. 4.8, б), снижает изгибающий момент.

Дальнейшего улучшения конструкции можно достичь введением рёбер (рис. 4.8, в, г) и приближением стенок к оси болтов путём гофрирования стенок (рис. 4.8, д) или расположения болтов в нишах (рис. 4.8, е).

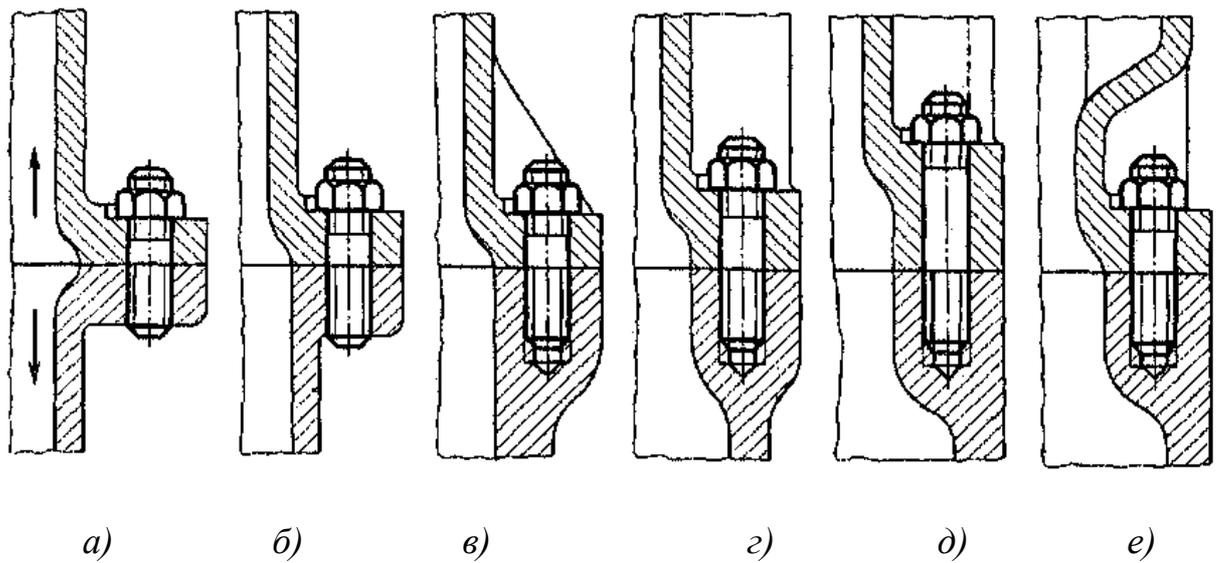


Рис. 4.8. Устранение изгиба фланцевого соединения, нагруженного растягивающими силами

#### 4.4. Равнонагруженность опор

При проектировании узлов с подшипниками качения целесообразно обеспечивать равную долговечность подшипников.

В зубчатой передаче (рис. 4.9, а) нагрузка  $F_1$  на малое колесо от сил привода больше нагрузки  $F_2$  на большое колесо в отношении  $D_2/D_1 \approx 3$ .

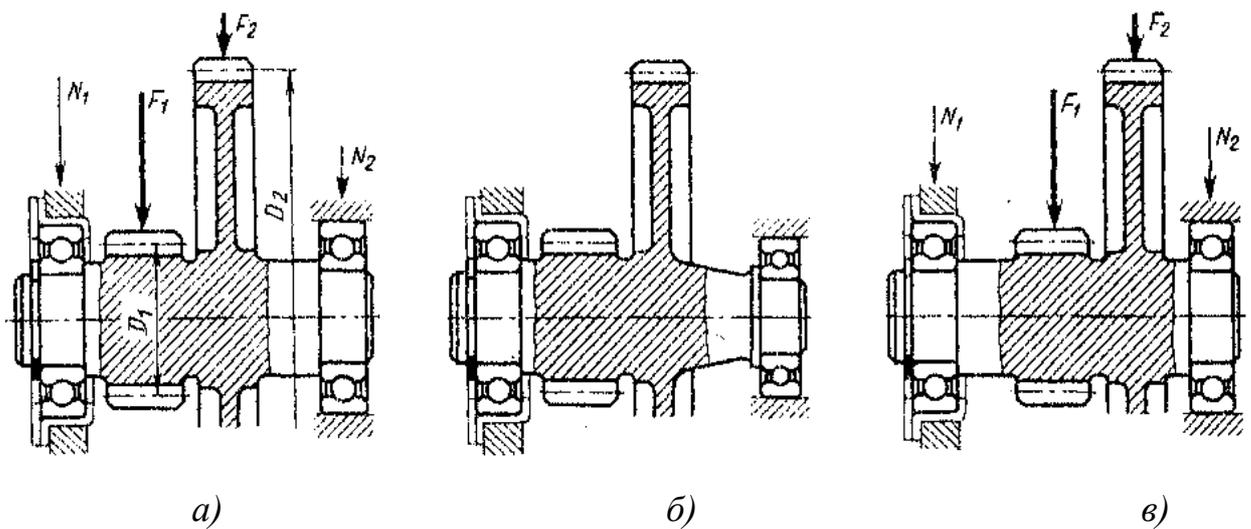


Рис. 4.9. Придание опорам вала редуктора равной долговечности

При указанном расположении опор левый подшипник нагружен силой  $N_1$  в 2 раза превышающей силу  $N_2$ , действующую на правый подшипник.

Опоры можно сделать равнодолговечными, установив на правом конце вала малый подшипник (рис. 4.9, б) с допустимой нагрузкой в 2 раза меньшей, чем у левого подшипника. Однако в интересах унификации желательно сохранить одинаковые подшипники, поэтому целесообразно изменить расположение опор относительно действующих сил так, чтобы уравнивать нагрузку на оба подшипника (рис. 4.9, в).

В узле консольной установки крыльчатки центробежного компрессора на вал действует радиальная сила  $F_1$  от неуравновешенности крыльчатки и осевая сила  $F_2$  давления рабочей жидкости на крыльчатку (рис. 4.10, а). Передний, ближайший к крыльчатке подшипник нагружен большой радиальной силой  $N_1$ , и осевой силой  $F_2$ , задний подшипник - незначительной радиальной силой  $N_2$ . В конструкции на рис. 4.10, б осевую силу  $F_2$  воспринимает задний подшипник, вследствие чего нагрузка на подшипники становится более равномерной. В конструкции на рис. 4.10, в вал установлен на разных подшипниках с допустимой нагрузкой, соответствующей действующим на них силам.

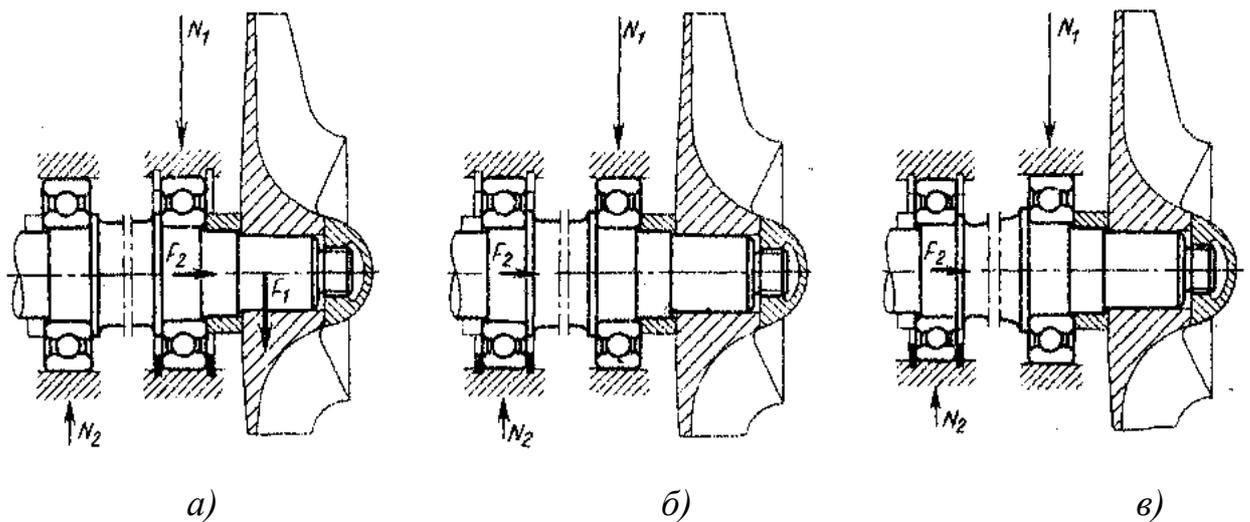


Рис. 4.10. Придание опорам крыльчатки центробежного компрессора равной долговечности

#### 4.5. Принцип самоустанавливаемости

В подвижных соединениях, где возможны перекосы и смещения деталей, необходимо предусматривать свободу самоустанавливаемости, обеспечивающую правильную работу деталей при возможных неточностях изготовления и монтажа.

В подпятнике с жёсткой установкой опорной шайбы в корпусе (рис. 4.11, *а*) пятя вследствие неизбежных в системе перекосов работает по шайбе краями. В конструкции рис. 4.11, *б* шайба установлена на сферической опоре, что обеспечивает контакт по всей поверхности трения. Кроме того, шарнирная установка допускает образование клинового зазора, обеспечивающего гидродинамическую смазку.

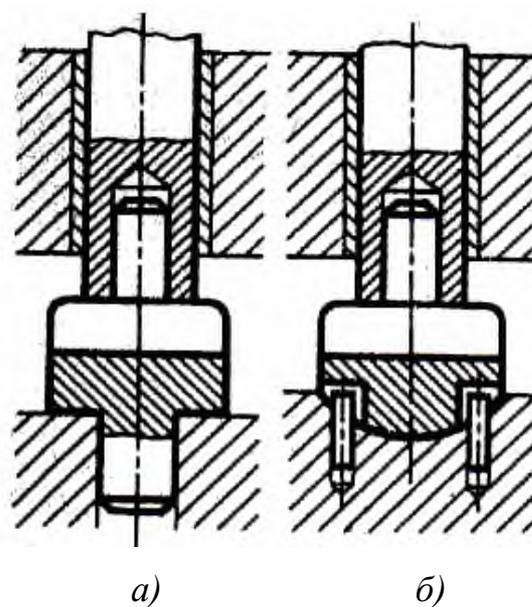


Рис. 4.11. Обеспечение самоустанавливаемости подпятника

Принцип самоустанавливаемости широко применяют в конструкции опор валов, подверженных изгибу и перекосам. Самоустанавливаемость особенно необходима в случае подшипников скольжения с большим отношением длины к диаметру. При жёсткой установке подшипника изгиб и перекося вала вызывают повышенные кромочные давления, ухудшающие условия работы подшипника (рис. 4.12, *а*).

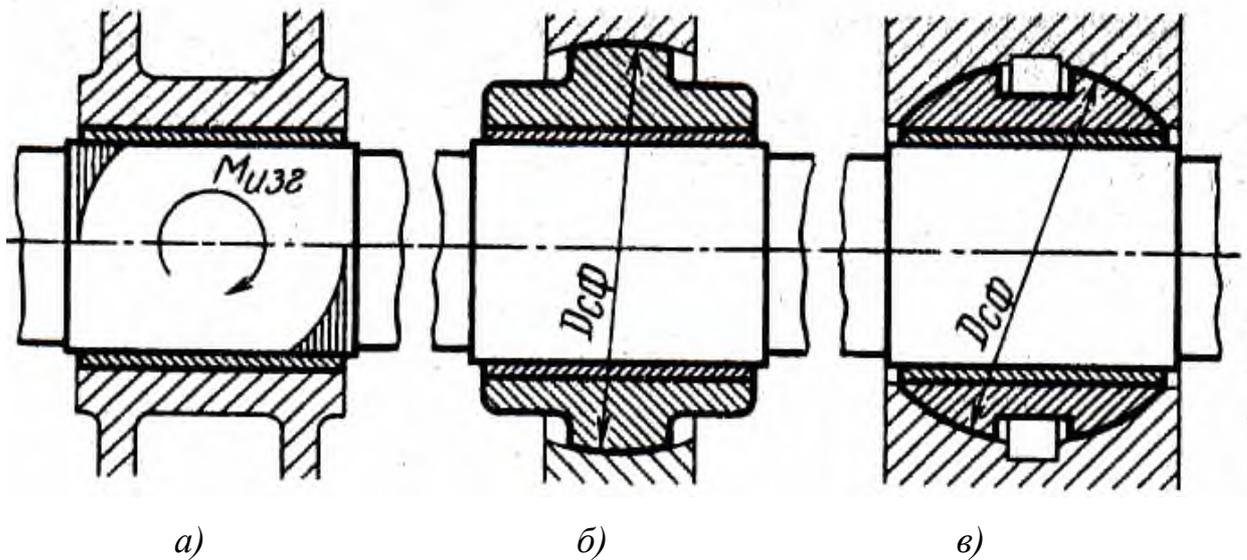


Рис. 4.12. Обеспечение самоустанавливаемости подшипника скольжения

Долговечность вкладышей можно существенно повысить, если использовать принцип самоустанавливаемости, для чего подшипники устанавливают на сферических опорах (рис. 4.12, б, в).

В шариковых радиальных подшипниках изгиб вала вызывает перекос подшипника и одностороннюю нагрузку шариков, иногда намного превышающую номинальную нагрузку (рис. 4.13, а).

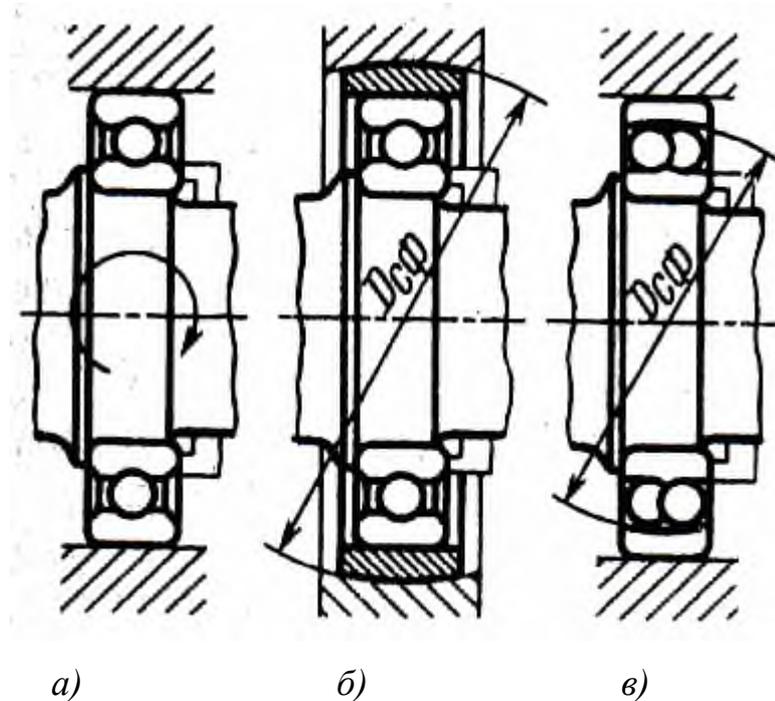


Рис. 4.13. Обеспечение самоустанавливаемости шарикового радиального подшипника

Для устранения возможного перекоса подшипника и более равномерной нагрузки тел качения наружное кольцо подшипника можно поместить в сферическую обойму (рис. 4.13, б) или применить двухрядные сферические подшипники (рис. 4.13, в). Сферические двухрядные подшипники обладают пониженной нагруженной способностью по сравнению с однорядными радиальными подшипниками вследствие неблагоприятной для контактной прочности формы наружных беговых дорожек. Кроме того, они не приспособлены для восприятия значительных осевых сил. Поэтому в узлах, воспринимающих повышенную осевую нагрузку, рекомендуется применять однорядные подшипники на сферических опорах (рис. 4.14, а) или двухрядные самоустанавливающиеся подшипники с бочкообразными роликами (рис. 4.14, б).

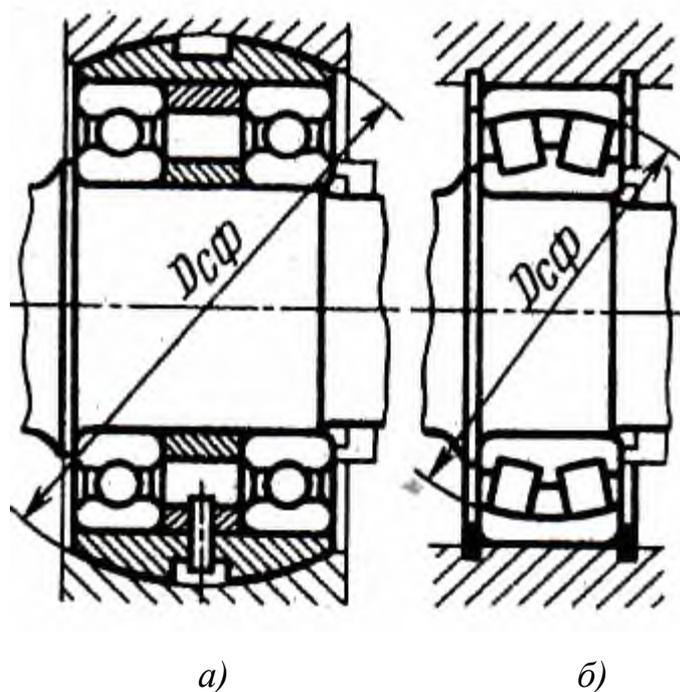


Рис. 4.14. Обеспечение самоустанавливаемости подшипников качения

Конструкция тарельчатого клапана (рис. 4.15, а), в которой тарелка жёстко закреплена на хвостовике шпинделя, не обеспечивает безззорной посадки клапана на седло вследствие неизбежного отклонения от перпендикулярности посадочной плоскости относительно оси шпинделя.

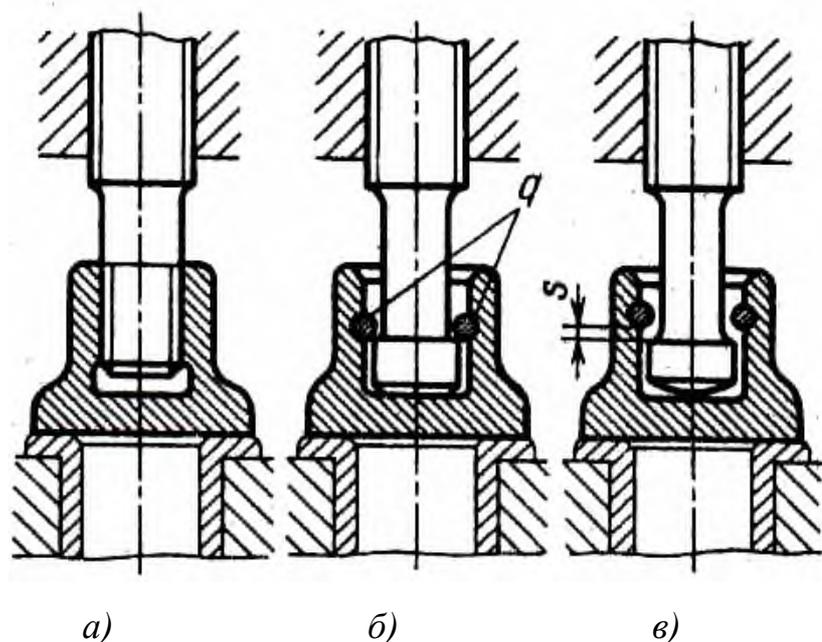


Рис. 4.15. Обеспечение самоустанавливаемости тарельчатого клапана

Другая ошибка заключается в том, что тарелка при посадке вращается вместе со шпинделем относительно седла. Последняя ошибка исправлена в конструкции, где тарелка зафиксирована на хвостовике шпинделя двумя поперечными штифтами  $q$  (рис. 4.15, б). При закрытии клапана шпиндель проворачивается относительно тарелки. Однако беззазорная посадка клапана не обеспечена.

В более целесообразной конструкции (рис. 4.15, в) торец шпинделя выполнен по сфере, благодаря чему тарелка клапана свободно самоустанавливается и плотно садится на седло при всех возможных неточностях изготовления. Для обеспечения самоустановки фиксирующие штифты посажены с зазором  $s$  относительно заплечика хвостовика шпинделя.

В зажимном приспособлении силу зажима воспринимает практически одна точка рифленой поверхности, при этом резьба зажимного болта подвергается изгибу (рис. 4.16, а). Изгиб болта можно предотвратить затяжкой гайки на сферическую шайбу (рис. 4.16, б). Установка болта на шарнире придает механизму дополнительное преимущество быстроты действия. Для удобства манипулирования введена пружина, предупреждающая спадание шайбы при откидывании болта.

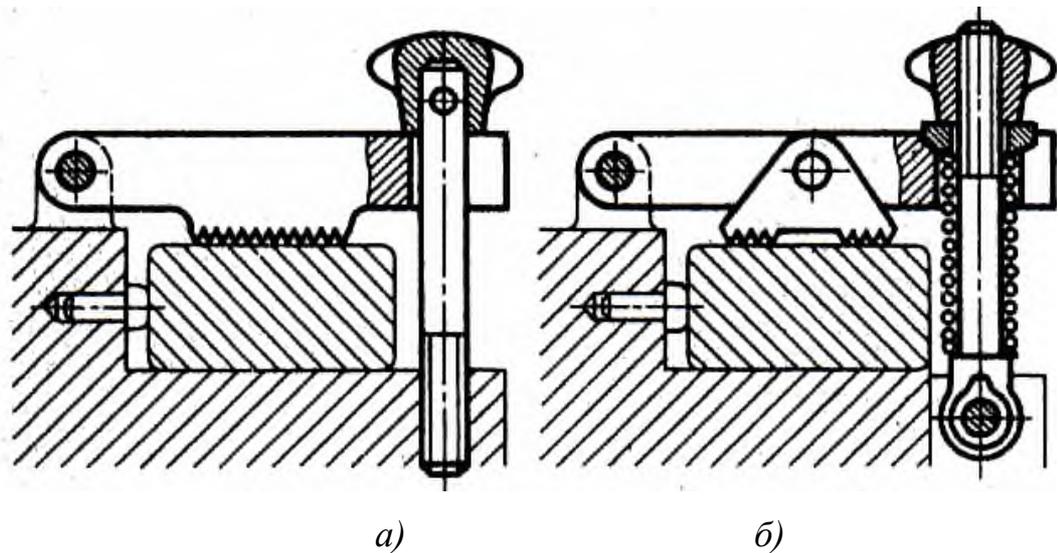


Рис. 4.16. Обеспечение самоустанавливаемости болта зажимного устройства

Приспособление (рис. 4.17, *a*) предназначено для зажима пакета заготовок с помощью рычага *W*, приводимого штоком *X* гидравлического цилиндра. Вследствие колебаний размеров заготовок неизбежен зажим в одной точке. Например, если пакет имеет увеличенные осевые размеры, то зажим осуществляется нижним краем упорной поверхности рычага, при этом возможно выворачивание заготовок. Установка упорного элемента на шарнире обеспечивает правильный зажим (рис. 4.17, *б*).

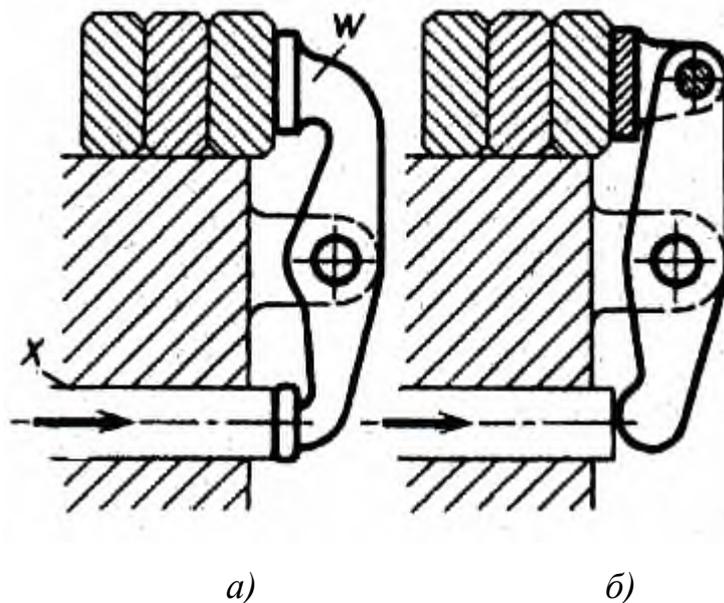


Рис. 4.17. Обеспечение самоустанавливаемости упора зажимного рычага

#### 4.6. Осевая фиксация деталей

Детали следует фиксировать в осевом направлении только в одной точке, обеспечивая возможность её самоустановки по остальной длине.

Если, например, палец зафиксирован врезными винтами в двух опорах (рис. 4.18, *а*), то при тепловом изменении размеров в узле возникают температурные напряжения. В правильной конструкции (рис. 4.18, *б*), закреплён только один конец пальца, противоположный конец может свободно перемещаться в опоре.

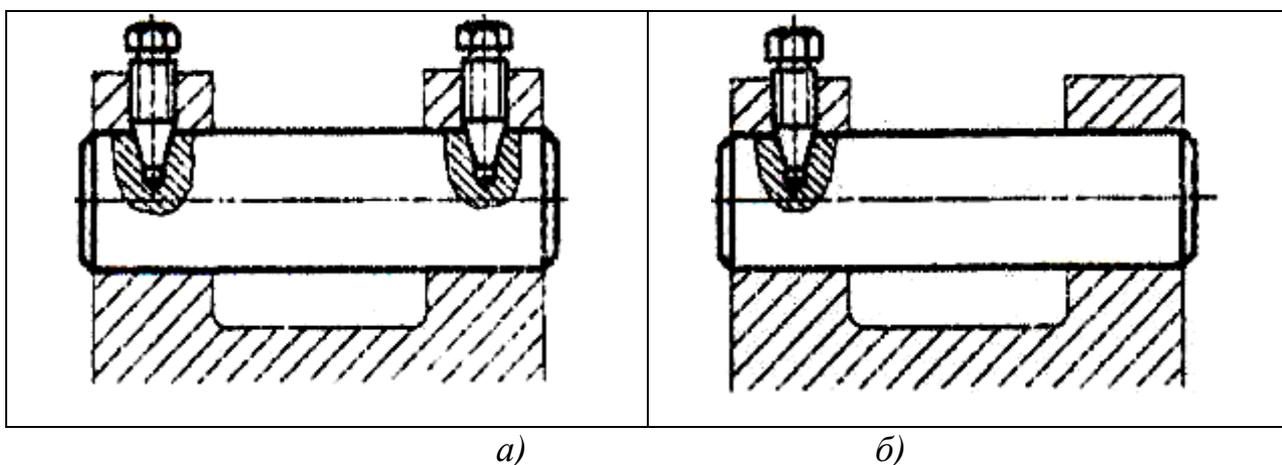


Рис. 4.18. Неправильная (*а*) и правильная осевая фиксация пальца

В ошибочной конструкции в зубчатой передаче с шевронным зубом колёса зафиксированы в осевом направлении дважды - зубьями и упорами в торцы подшипников (рис. 4.19, *а*). Добиться совпадения фиксирующих баз практически невозможно. Ошибку можно исправить, предусмотрев зазоры  $s$ , допускающие самоустановку одного из пары колес по зубу (рис. 4.19, *б*).

В узле установки вала зубчатого колеса в подшипниках скольжения вал зафиксирован в двух точках, находящихся на большом расстоянии одна от другой (рис. 4.20, *а*). Точная фиксация в данном случае невозможна, так как во избежание заклинивания опорных поверхностей при тепловом расширении корпуса, а также с учётом неточностей изготовления и монтажа необходим большой зазор между фиксирующими поверхностями.

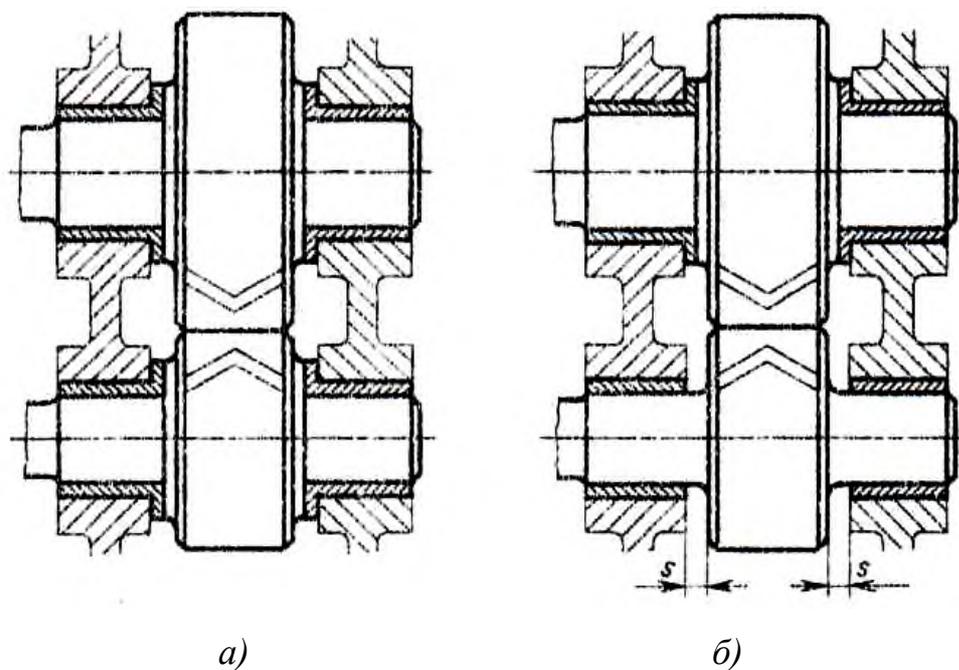


Рис. 4.19. Неправильная (а) и правильная осевая фиксация пальца

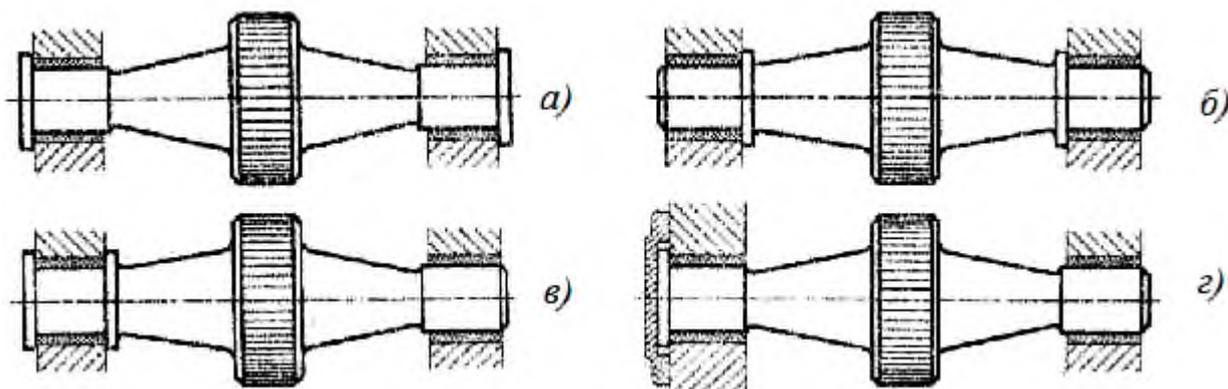


Рис. 4.20. Последовательное улучшение конструкции узла установки вала зубчатого колеса в подшипниках скольжения

Несколько улучшает конструкцию сближение фиксирующих поверхностей (рис. 4.20, б). В более правильных конструкциях вал зафиксирован на коротком участке, противоположный конец вала самоустанавливается в опоре (рис. 4.20, в, г).

На свободных участках деталей следует предусматривать запасы на самоустановку и производственные отклонения размеров.

Рассмотрим случай установки вала в корпусе на подшипниках качения. В исходной конструкции (рис. 4.21, *а*) осевые размеры, определяющие взаимное расположение вала, подшипников и корпуса, даны по номиналу. В улучшенной конструкции (рис. 4.21, *б*) предусмотрены запасы:  $m$  – на посадочной поверхности корпуса под «плавающий» подшипник;  $h$  – на посадочной поверхности корпуса относительно фиксирующих кольцевых стопоров;  $k$  – в резьбе под гайку;  $n$  – на посадочной поверхности вала под «плавающий» подшипник. Запасы устанавливают расчётом размерных цепей с учетом тепловых деформаций системы. Наибольшие запасы следует предусматривать на участках сопряжения с чёрными литыми поверхностями, где колебания размеров особенно велики (для отливок средних размеров и средней точности литья запасы назначают в пределах 3-4 мм).

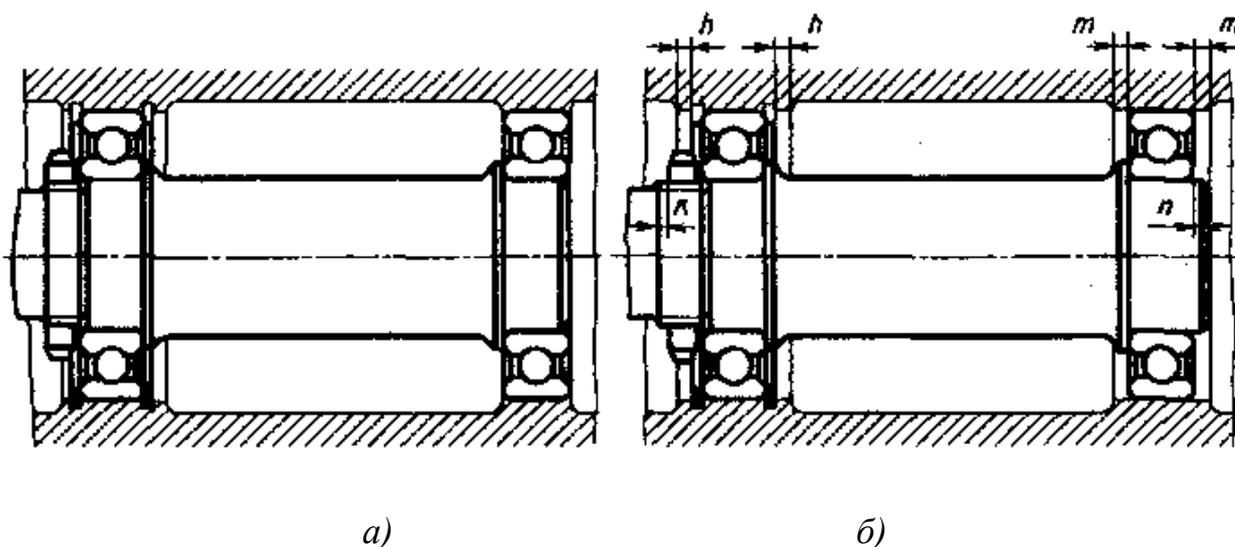


Рис. 4.21. Исходная (*а*) и улучшенная (*б*) установка вала в корпусе

## 4.7. Конструирование литых деталей

### Общие сведения.

Литьё широко применяют для изготовления фасонных деталей от мелких до самых крупных типа базовых и корпусных. У многих машин (двигатели внутреннего сгорания, турбины, компрессоры, металлорежущие станки и т. д.) масса литых деталей составляет 60-80% массы машины.

С помощью литья можно получить детали самой сложной конфигурации, невыполнимые другими способами формообразования. Литейный процесс производителен и сравнительно недорог.

Для литых деталей характерны пониженная прочность, различие механических показателей в разных участках отливки, склонность к образованию дефектов и напряжений. Качество отливки зависит от технологии литья и конструкции детали, поэтому конструктор должен знать основные правила литейной техники и уверенно владеть приемами, обеспечивающими получение качественных отливок при наименьших производственных затратах.

Применяют следующие способы литья.

*Литьё в песчаные (земляные) формы.* Наиболее распространенный и универсальный способ литья и практически единственный способ изготовления крупногабаритных отливок. Формовку производят по деревянным или металлическим моделям в опоках, набиваемых песчано-глинистыми смесями. Точность размеров отливки зависит от качества изготовления формы и свойств литейного сплава (отклонения от номинальных размеров около 7%). Параметры шероховатости поверхности  $Rz = 10...40$  мкм. Производительность литейного процесса и качество отливок значительно повышаются при машинной формовке (набивка опок с помощью прессовых, встряхивающих и пескометных машин).

*Литьё в оболочковые формы.* Формы готовят по металлическим моделям в виде оболочек толщиной 6...15 мм из песчаных смесей с термореактивной смолой (бакелит) и отверждают нагревом до 150...350°C. Способ применяют преимущественно для отливки корытообразных и чашеобразных деталей размером до 1 м. Точность размеров  $\pm 5\%$ , параметры шероховатости от  $Ra = 1,25...2,5$  мкм до  $Rz = 10...20$  мкм.

*Кокильное литьё.* Металл заливают в постоянные чугунные или стальные формы (кокили). При отливке деталей малых размеров и деталей из цветных сплавов внутренние полости образуют металлическими стержнями,

при отливке средних и крупных деталей — песчаными стержнями (полукокильное литьё). Способ обеспечивает повышенную прочность отливок, точность +4%, параметры шероховатости те же, что и при литье в оболочковые формы.

*Центробежное литьё.* Применяется для отливки цилиндрических полых деталей типа труб. Металл заливают во вращающиеся чугунные или стальные барабаны, где он уплотняется действием центробежных сил. Точность отливки (толщина стенок) зависит от точности дозирования подачи металла. Мелкие детали отливают этим способом в постоянные металлические формы.

*Литьё под давлением.* Способ обеспечивает высокую точность размеров ( $\pm 1\%$ ) и производительность, малую шероховатость поверхности. Металл заливают в постоянные стальные формы под давлением 3...5 МПа. Последующая механическая обработка, как правило, не требуется. Этот вид литья применяют для массового изготовления небольших и средних деталей, преимущественно из легкоплавких сплавов (алюминиевых, медно-цинковых и др.). Для отливки стальных и чугунных деталей пресс-формы необходимо изготавливать из жаропрочных сталей.

*Литьё по выплавляемым моделям.* Модели изготавливают из легкоплавких материалов (парафин, стеарин, воск, канифоль) посредством литья под давлением в металлические пресс-формы. Модели соединяют в блоки, покрывают тонким слоем огнеупорного состава (кварцевый порошок с этилсиликатом или жидким стеклом) и заформовывают в неразъёмные песчаные формы, которые прокаливают при 850...900<sup>0</sup>С, в результате чего модели без остатка удаляются. В образовавшиеся полости заливают металл при нормальном давлении или под давлением 0,2...0,3 МПа. Способ применяют для отливки мелких и средних деталей произвольной конфигурации. Высокая точность размеров ( $\pm 2\%$ ) и малая шероховатость поверхности позволяют в большинстве случаев обойтись без последующей механической обработки, вследствие чего этот способ часто применяют для

изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов (например, турбинных лопаток из жаропрочных сплавов).

### **Толщина стенок.**

Стенки литых деталей обладают неодинаковой прочностью в поперечном сечении из-за различия условий кристаллизации. Прочность максимальна в поверхностном слое, где металл, вследствие повышенной скорости охлаждения, приобретает мелкокристаллическую структуру и где образуются благоприятные для прочности остаточные напряжения сжатия. В поверхностном слое чугунных отливок преобладают перлит и цементит. Сердцевина, застывающая медленнее, имеет крупнокристаллическое строение с преобладанием феррита и графита. В ней нередко образуются дендритные кристаллы и возникают усадочные раковины и рыхлоты.

Чем массивнее стенка, тем больше разница между прочностью сердцевины и корки, поэтому увеличение толщины стенок не сопровождается пропорциональным увеличением прочности отливки. По этим причинам, а также для уменьшения массы целесообразно выполнять стенки отливок наименьшей толщины, которая допускается условиями литья. Необходимую жёсткость и прочность обеспечивают ребрением, применением рациональных профилей, приданием, детали выпуклых, сводчатых, сферических, конических и тому подобных форм. Такой метод всегда приводит к получению более лёгких конструкций.

Качество формы отливки можно приближенно оценить отношением площади её поверхности к объёму или при данной длине отношением периметров  $P$  к площади сечения  $A$

$$\Omega = P/A.$$

Сравним между собой отливки равной массы из круглого сечения диаметром  $D_0$  и кольцевого сечения с наружным диаметром  $D_1$  и внутренним диаметром  $d_1$ .

Для сплошного профиля будем иметь

$$\Omega_0 = \frac{\Pi_0}{A_0} = \frac{\pi \cdot D}{\pi \cdot D_0^2 / 4} = \frac{4}{D_0}.$$

При одинаковой массе площади поперечных равны и поэтому

$$A_0 = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} = A_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \left[ 1 - \left( \frac{d_1}{D_1} \right)^2 \right].$$

Откуда следует

$$D_1 = \frac{D_0}{\sqrt{1 - (d_1/D_1)^2}}.$$

Следовательно, для кольцевого сечения получим

$$\Omega_1 = \frac{\Pi_1}{A_1} = \frac{\pi \cdot D_1}{A} = \frac{4}{D_1 [1 - (d_1/D_1)^2]} = \frac{4}{D_0 \sqrt{1 - (d_1/D_1)^2}}.$$

Отношение  $\Omega_1/\Omega_0$  характеризует насколько кольцевой профиль эффективнее сплошного, при этом для более тонкостенных профилей эффект больше. Например, при отношении  $d_1/D_1=0,8$  получим  $\Omega_1/\Omega_0=1,67$ , при  $d_1/D_1=0,8$  -  $\Omega_1/\Omega_0=3,33$ .

Аналогичные выводы справедливы и для других тонкостенных профилей.

Массивные литейные формы нецелесообразны по прочности и массе (рис. 4.22, а). Правильные литейные формы - это тонкостенные, развитые по периферии формы (рис. 4.22, б).

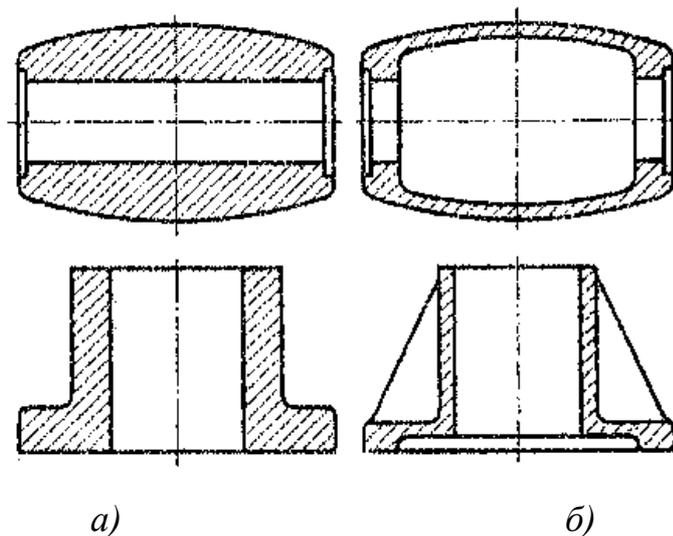


Рис. 4.22. Формы нерациональных (а) и рациональных (б) литых деталей

Механическую обработку литых деталей следует сводить к минимуму не только в интересах сокращения стоимости изготовления, но и по соображениям прочности, так как при механической обработке удаляется наиболее прочный поверхностный слой. Участки, подвергаемые механической обработке, усиливают, утолщая прилегающие стенки.

### Упрощение формы.

Конструкция отливки должна обеспечивать простое и удобное изготовление формы, в частности:

- модель должна беспрепятственно извлекаться из формы;
- стержни должны свободно формироваться в стержневых-ящиках;
- форма и крепление стержней не должны препятствовать сборке формы.

Для удешевления производства и повышения точности отливки следует всемерно упрощать форму отливок. Контуры деталей и внутренних полостей рекомендуется образовывать простейшими линиями — прямыми, дугами окружности и т. д.

Кронштейн, изображенный на рис. 4.23, *а*, имеет неоправданно сложные продольный и поперечный профили, так как выдержать одинаковые переходы в модели и стержневом ящике трудно, поэтому неизбежна разностенность отливки. В целесообразной конструкции рис. 4.23, *б* сечениям придана простая прямоугольная форма.

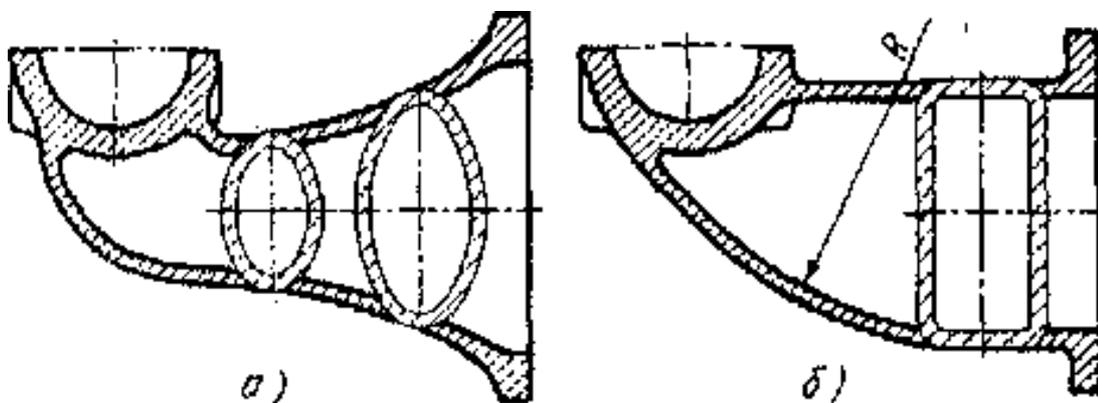


Рис. 4.23. Упрощение формы литых деталей

Крупные и сложные литые детали целесообразно разделять на части.

В корпусе вертикального редуктора (рис. 4.24, *а*) из-за уклона на днище требуется отливка в наружных стержнях. При разделении (рис. 4.24, *б*), части корпуса приобретают более простую форму открытых отливок, формируемых без стержней.

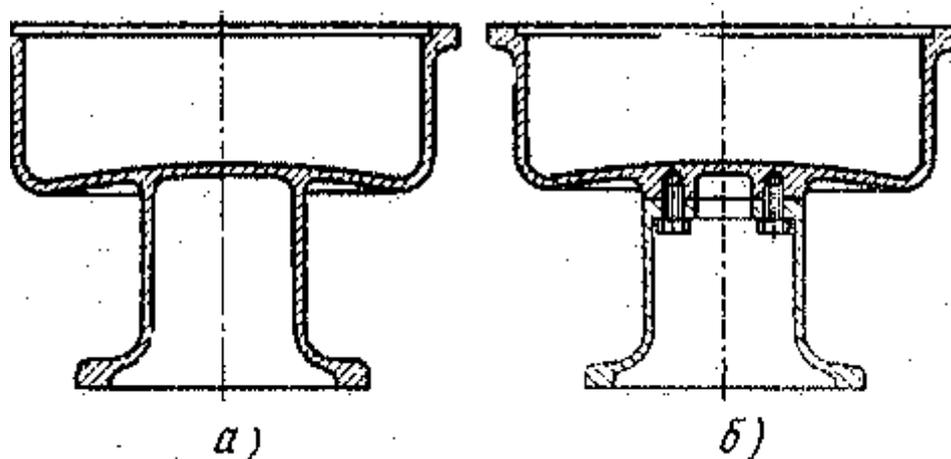


Рис. 4.24. Расчленение сложных отливок на простейшие части

В узлах, состоящих из нескольких литых деталей, рекомендуется упрощать отливку наиболее сложной и крупной детали, несколько усложняя более простую из стыкуемых деталей.

#### **Формовочные уклоны.**

Для облегчения выемки модели из формы поверхностям, перпендикулярным к плоскости разъёма, придают формовочные (литейные) уклоны. В табл. 4.1 приведены стандартные уклоны в зависимости от высоты  $h$  поверхности над плоскостью разъёма и соответствующее поперечное смещение крайних точек поверхности  $h \operatorname{tg} \alpha$ .

Величину стандартных уклонов на чертежах не проставляют, и детали вычерчивают без уклонов. Однако уклоны следует учитывать, особенно при конструировании деталей, имеющих большую высоту.

В цилиндрической детали (рис. 4.25, а) фланец обтачивается до диаметра 560 мм, т.е. на 10 мм больше диаметра чёрной необработанной поверхности  $\varnothing 550$  мм.

Таблица 4.1

Стандартные формовочные уклоны

Высота над поверхностью разъёма $h$ , мм	Угол наклона стенки $\alpha$	Уклон $tg\alpha$	$h tg\alpha$ , мм
До 20	$3^\circ$	0,052	До 1
20-50	$1^\circ 30'$	0,026	0,5-1,25
50-100	$1^\circ$	0,0175	0,9-1,8
100-200	$45'$	0,013	1,3-2,6
200-800	$30'$	0,010	2-8
800-2000	$20'$	0,006	5-12
Более 2000	$15'$	0,004	Более 8

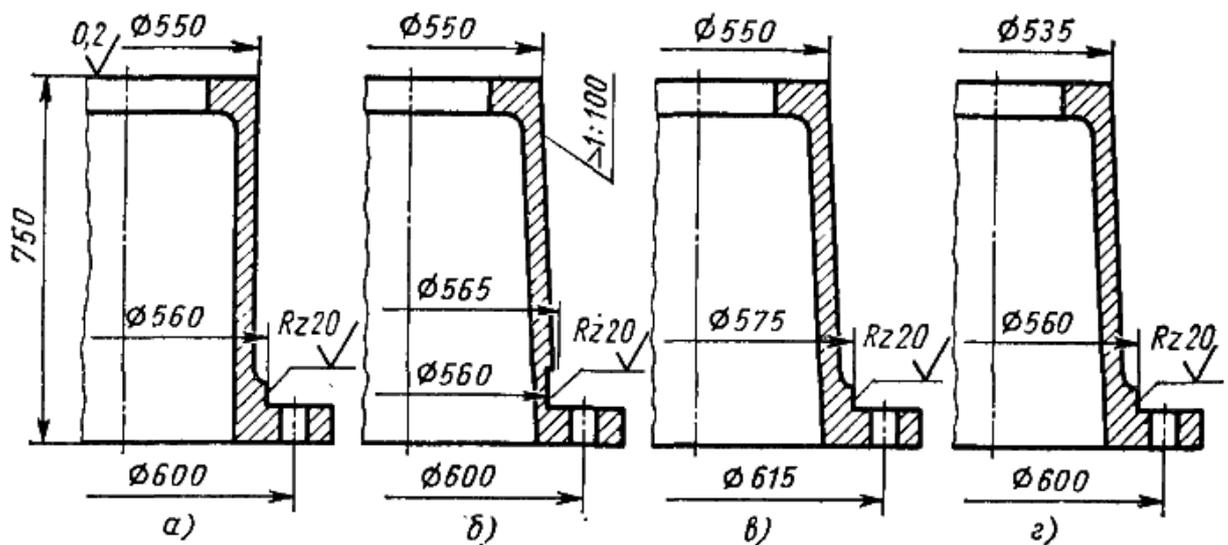


Рис. 4.25. Влияние литейных уклонов на конструкцию

Такая конфигурация невыполнима, так как при стандартном уклоне (1:100) диаметр чёрной поверхности у основания цилиндра равен  $550 + 2 \cdot 750 \cdot 0,01 = 565$  мм и инструмент врежется в стенку (рис. 4.25, б).

Необходимо или увеличить диаметр обрабатываемой поверхности до 575 мм, что влечёт за собой увеличение диаметра расположения болтов с 600 до 615мм (рис. 4.25, в), или уменьшить диаметр верхней части цилиндра до 535мм (рис. 4.25, з).

На чертежах крупногабаритных отливок целесообразно указывать уклон или предпочтительнее предусматривать конструктивные уклоны, превышающие формовочные уклоны. Придерживаться стандартных конструктивных уклонов необязательно.

Форму детали следует определять исходя из условия максимальной прочности и жёсткости, а также красивого внешнего вида, с учётом условий формовки, литья и механической обработки.

Пример оформления литой детали в порядке возрастающей жёсткости и улучшения условий литья показан на рис. 4.26.

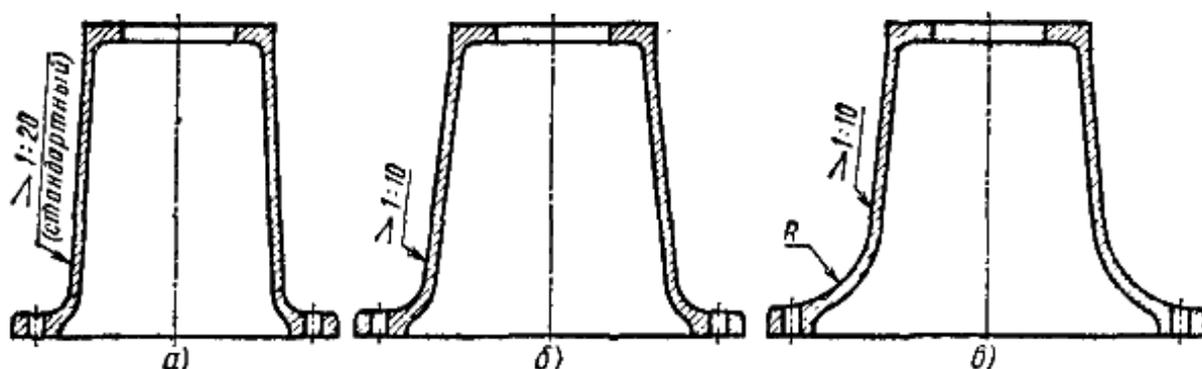


Рис. 4.26. Формы литых деталей

### Усадка отливок.

Усадкой называют сокращение размеров отливки при остывании.

Линейная усадка (%) равна

$$\frac{L - L_0}{L} = \alpha(t_c - t_0)100\%,$$

где  $L$  - размер отливки, при температуре  $t_c$  затвердевания металла (точка солидуса);  $L_0$  - размер после остывания до цеховой температуры  $t_0$ ;  $\alpha$  -

среднее значение коэффициента линейного расширения металла в интервале температур от  $t_0$  до  $t_c$ .

Коэффициент линейного расширения имеет характерную для каждого металла величину, и несколько уменьшается с понижением температуры и скачкообразно изменяется при фазовых превращениях в процессе остывания (увеличение объёма при перлитизации сталей, перлитизации и графитизации серых чугунов в интервале эвтектоидного превращения 720...730°C).

*Объёмная усадка* характеризует изменение в процентах (%) объёма отливки при остывании. На основании предыдущего выражения

$$\frac{V - V_0}{V} = \left( \frac{L}{L_0} \right)^3 - 1 = [1 + \alpha(t_c - t_0)]^3 - 1 \approx 3\alpha(t_c - t_0),$$

т. е. объёмная усадка приблизительно в 3 раза больше линейной.

Усадка является одним из основных показателей литейных качеств материала и наряду с другими свойствами (жидкотекучесть, теплоёмкость, теплопроводность, окисляемость, склонность к образованию ликватов) определяет пригодность металла к литью. Чем меньше усадка, тем больше точность размеров отливки и тем меньше опасность появления усадочных напряжений, раковин, трещин и коробления отливки. Линейная усадка основных литейных сплавов имеет следующие значения.

<b>Материал</b>	<b>Линейная усадка, %</b>
Чугуны фосфористые	0,7...0,8
Чугуны серые ..	1...1,2
Чугуны высокопрочные	1,5...1,8
Стали углеродистые	1,8...2
Стали легированные	1,8...2,5
Бронзы фосфористые	0,6...0,8
Бронзы оловянные	1,3...1,6
Бронзы алюминиевые	2...2,2
Алюминиево-медные сплавы	1,4...1,5
Алюминиево-магниевые сплавы	1,2...1,3

Алюминиево-кремниевые сплавы	1...1,2
Магниевые сплавы	1,5...1,7

Приведенные показатели относятся к случаю свободной усадки, их определяют на образцах, отлитых в открытые горизонтальные формы. Фактическая усадка зависит от сопротивления, оказываемого внутренними частями формы сокращению размеров отливки (стесненная усадка). При жестких стержнях усадка может уменьшиться на 30...50% по сравнению со свободной усадкой, но при этом в стенках отливки, возникают повышенные усадочные напряжения. Усадку учитывают корректировкой размеров формы.

*Внутренние напряжения* возникают в стенках отливки, усадка которых тормозится сопротивлением элементов формы или действием смежных стенок. Усадочные раковины и пористость появляются в частях отливки, застывающих в последнюю очередь - в утолщениях и массивах, теплоотвод от которых затруднен (горячие узлы).

Повышенные внутренние напряжения вызывают коробление отливки и могут привести к образованию трещин.

Со временем внутренние напряжения перераспределяются и частично рассеиваются в результате медленно протекающих диффузионных процессов (естественное старение). Через длительный промежуток времени (2-3 года) деталь меняет первоначальную форму, что недопустимо для точных машин (например, металлорежущих станков).

Усадочные напряжения возникают лишь на тех стадиях остывания, на которых металл теряет пластичность (для чугуна в интервале 500...600°C, для стали 600...700°C). При более высоких температурах изменение размеров компенсируется пластическим течением металла, здесь усадка проявляется лишь утонением стенок.

### **Оребрение.**

Для увеличения жёсткости, особенно литых корпусных деталей, широко применяют оребрение. Однако при этом необходимо соблюдать

осторожность, так как неправильное соотношение сечений рёбер и оребряемой детали может вместо упрочнения привести к ослаблению.

У деталей, подвергающихся изгибу в плоскости расположения наружных рёбер (рис. 4.27, а), на вершине ребра возникает напряжения растяжения, достигающие большого значения вследствие малой ширины и малого сечения ребра. Особенно опасны тонкие ребра, сужающиеся к вершине (рис. 4.27, б, в); разрушение детали всегда начинается с разрыва вершины рёбер. Ослабление детали ребрами связано с уменьшением момента сопротивления сечения детали. Прочность значительно возрастает при утолщении ребер, особенно на опасном участке у вершины (рис. 4.27, г, д).

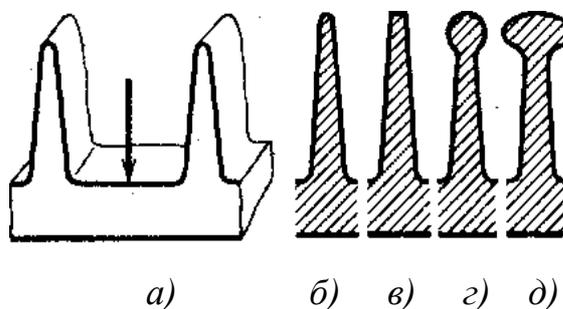


Рис. 4.27. Формы рёбер, работающих на растяжение при изгибе детали

Рёбра, работающие при изгибе на сжатие, в литых корпусных деталях гораздо прочнее, так как почти все литейные материалы (за исключением сплавов Mg) значительно лучше сопротивляются сжатию, чем растяжению.

При конструировании рёбер рекомендуется:

- избегать нагружение рёбер на растяжение;
- применять во всех случаях, когда это допускает конструкция - рёбра сжатия;
- избегать (особенно при рёбрах растяжения) низких, тонких и редко расставленных рёбер, снижающих прочность детали;
- в корпусных деталях применять внутреннее оребрение (за исключением особых случаев, например, когда наружные рёбра необходимы для охлаждения детали);

- подводить рёбра к узлам жёсткости (рис. 4.28, *а*, *б*), в частности к точкам расположения крепёжных болтов (рис. 4.28, *в*, *г*);
- избегать рёбер криволинейного очертания, испытывающих при растяжении дополнительный изгиб, применять прямые рёбра;
- утолщать вершины (особенно у рёбер растяжения) в которых при изгибе возникают наиболее высокие напряжения.

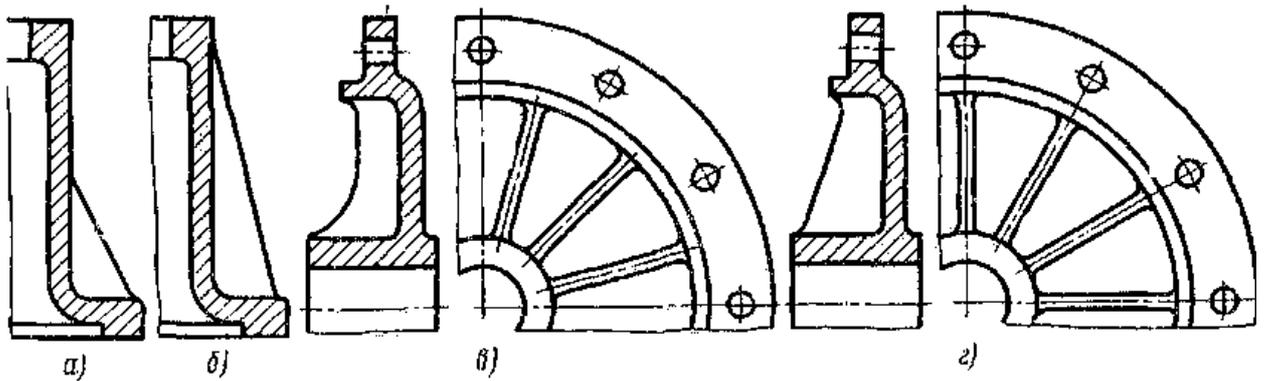


Рис. 4.28. Целесообразные (*б*, *г*) и нецелесообразные (*а*, *в*) формы рёбер

Короткие рёбра ослабляют перегородку на участках *n* (рис. 4.29, *а*, *б*)  
 Лучше использовать конструкции с рёбрами постоянной высоты (рис. 4.29, *в*)  
 или расширяющимися к месту заделки (рис. 4.29, *г*). Наибольшей прочностью обладают конструкции с гофрированной перегородкой (рис. 4.29, *д*) и коробчатые *10*, особенно усиленные внутренними поперечными рёбрами.

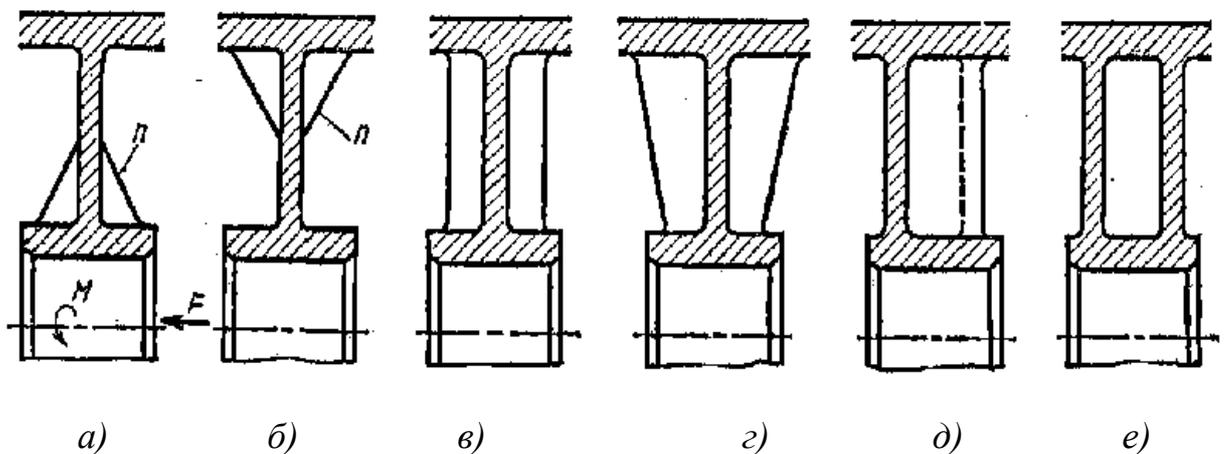


Рис. 4.29. Влияние формы и расположения рёбер на прочность

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Альтшуллер Г.С. Творчество как точная наука. - Петрозаводск: Скандинавия, 2006. - 205 с.
2. Анурьев В.И. Справочник конструктора – машиностроителя. В 3-х т. - М.: Машиностроение, 2001. - Т. 1, 920 с.; Т. 2, 912 с.; Т. 3, 864 с.
3. Детали машин: Учебник / Л.А. Андриенко, Б.А. Байков, И.К. Ганулич и др. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. – 544 с.
4. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Конструирование узлов и деталей машин. - Учебное пособие. - М.: Академия, 2004. - 496с.
5. Иванов А.С. Конструируем машины: шага за шагом. В 2-х частях. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. - Ч.1. 2000, 328 с.; Ч.2. 2003, 392 с.
6. Конструирование машин. В 2-х томах / Под ред. К.В.Фролова. – М.: Машиностроение, 1994. - Том 1, 528 с. Том 2, 624 с.
7. Ловчиновский Э.В., Вагин В.С. Эксплуатационные свойства металлургических машин. – М.: Металлургия, 1986. – 160 с.
8. Орлов П.И. Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. В 3-х книгах. - М.: Машиностроение, 1977. - Кн.1, 623 с.; Кн.2., 574 с.; Кн. 3, 360 с.
9. Основы теории систем и решения творческих технических задач / В.А. Михайлов, Е.Д. Андреев, В.П. Желтов и др. – Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 2012. – 388 с.
10. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества: Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
11. Проников А.С. Параметрическая надёжность машин. - М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003. – 560 с.
12. Решетов Д.Н. Работоспособность и надёжность деталей машин. – М.: Высшая школа, 1974. – 205 с.
13. Хорошев А.Н. Введение в управление проектированием механических систем: Учебное пособие. – Белгород, 1999. - 372 с.
14. Шишко В.Б., Чиченев Н.А. Надёжность технологического оборудования: Учебник. – М.: Издательский дом МИСиС, 2012. – 1990 с.

ИВАНОВ С.А.  
НЕФЕДОВ А.В.  
ЧИЧЕНЕВ Н.А.

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ**

Учебник для студентов, обучающихся по специальности 150404 «Металлургические машины и оборудование» и направлениям подготовки бакалавров 150400 «Металлургия» и 151000 «Технологические машины и оборудование», всех форм обучения

Подписано в печать 19.02.2014		
Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег.№ 36	Печать офсетная Тираж 500 экз.	Уч.-изд.л. 12,5

ФГАОУ ВПО

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Новотроицкий филиал

462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.

E-mail: [nfmisis@yandex.ru](mailto:nfmisis@yandex.ru)

Контактный тел. 8 (3537) 679729.