

А.Т. СКОЙБЕДА  
А.В. КУЗЬМИН  
Н.Н. МАКЕЙЧИК

---

# ДЕТАЛИ МАШИН И ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ

ДЛЯ СТУДЕНТОВ ВУЗОВ

А.Т. СКОЙБЕДА  
А.В. КУЗЬМИН  
Н.Н. МАКЕЙЧИК

---

# ДЕТАЛИ МАШИН И ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ

Под общей редакцией доктора технических наук,  
профессора А.Т. Скойбеды

Утверждено  
Министерством образования Республики Беларусь  
в качестве учебника для студентов  
технических специальностей учреждений,  
обеспечивающих получение высшего образования

2-е издание, переработанное



Минск  
"Вышэйшая школа"  
2006

УДК 621.81 (075.8)

ББК 34.42я73

С44

Рецензенты: кафедра «Детали машин и ПТУ» Белорусского государственного технологического университета; доктор технических наук заведующий кафедрой «Сопротивление материалов и детали машин» Белорусского государственного аграрного технического университета *А.Н. Орда*

*Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или любой ее части не может быть осуществлено без разрешения издательства.*

**Скойбеда, А. Т.**

С44 Детали машин и основы конструирования: учебник / А. Т. Скойбеда, А. В. Кузьмин, Н.Н. Макейчик; под общ. ред. А. Т. Скойбеда. – 2-е изд., перераб. – Мн. : Выш. шк., 2006. – 560 с. : ил.  
ISBN 985-06-1055-7.

В учебнике изложены основы теории, расчета и конструирования деталей машин общего назначения. Приводятся инженерные методы проектирования наиболее распространенных видов соединений, передач, валов, их опор, муфт, упругих элементов и т. д.

Первое издание вышло в 2000 г.

Для студентов технических специальностей вузов.

**УДК 621.81(075.8)**

**ББК 34.42я73**

Учебное издание

**Скойбеда** Анатолий Тихонович

**Кузьмин** Артур Васильевич

**Макейчик** Николай Николаевич

## **ДЕТАЛИ МАШИН И ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ**

**Учебник**

Редактор *Э.Н. Капрова*. Художественный редактор *В.А. Ярошевич*. Технический редактор *Н.А. Лебедевич*. Корректоры *В.П. Шкредова, В.И. Аверкина*. Компьютерная верстка *Н.В. Шабуня*.

Подписано в печать 12.04.2006. Формат 60×90/16. Бумага офсетная № 1. Гарнитура «Школьная». Офсетная печать. Усл. печ. л. 35. Уч.-изд. л. 34,1. Тираж 3100 экз. Заказ

Республиканское унитарное предприятие «Издательство «Вышэйшая школа»». ЛИ № 02330/0056829 от 02.03.2004. 220048, Минск, проспект Победителей, 11.

Открытое акционерное общество «Полиграфический комбинат им. Я. Коласа». 220600, Минск, ул. Красная, 23.

© Скойбеда А. Т., Кузьмин А. В., Макейчик Н. Н., 2000

© Скойбеда А. Т., Кузьмин А. В., Макейчик Н. Н., 2006, с изменениями

**ISBN 985-06-1055-7**

© Издательство «Вышэйшая школа», 2006

## Предисловие

Как известно, главным показателем качества машин является надежность, которая обеспечивается на стадиях их проектирования, изготовления и эксплуатации. В курсе «Детали машин и основы конструирования» излагаются теоретические положения и инженерные методы обеспечения надлежащей надежности машин на стадии проектирования.

Цель курса – конструкторская подготовка студентов на основе современной науки о сопротивлении деталей машин различным видам нарушения их работоспособности.

Курс имеет самостоятельную научную базу. В нем раскрываются и объясняются физические процессы и явления, сопутствующие работе сборочных единиц и деталей.

Предметом изучения служат сборочные единицы и детали общего назначения, используемые в большинстве машин.

Методом исследования является анализ физических процессов, происходящих при работе деталей машин, с последующей экспериментальной проверкой результатов и разработка их инженерной оценки по различным критериям работоспособности. Учебник написан в соответствии с программой курса для технических специальностей вузов. Он включает предусмотренный программой раздел «Подъемно-транспортные машины», в котором на конкретных примерах показаны источники нагрузок в машинах с учетом происходящих в них динамических процессов, а также их трансформация в системе двигатель–трансмиссия–рабочий орган. Это помогает увидеть аналогию в расчетах деталей машин общего и специального назначения, а также раскрыть особенности расчетов последних. После изучения данного курса студент будет подготовлен к восприятию последующих дисциплин машиностроительного профиля.

Большое внимание в книге уделено общим вопросам теории взаимодействия поверхностей сопряженных деталей. Для удобства изучения некоторые виды деталей и сборочных единиц объединены в отдельные группы с общими или аналогичными критериями работоспособности.

В необходимых случаях даны ссылки на соответствующие стандарты, действующие в Республике Беларусь. Те из них, в которые внесены изменения, помечены звездочкой.

Вопросы автоматизированного проектирования, вероятностные расчеты и специфические расчеты на надежность не включены в учебник, так как они рассматриваются на семинарских занятиях, в учебных пособиях по курсовому проектированию и в сборниках задач по расчетам деталей машин. Это относится и к справочным, и нормативным материалам. Исключение составляют вошедшие в книгу разделы по расчетам зубчатых передач, в которых приведены справочные нормативные материалы ввиду недостатка соответствующей учебной литературы.

Во 2-м издании учебника учтен пятилетний опыт его использования в технических вузах Республики Беларусь и стран СНГ при изучении курсов «Детали машин», «Основы конструирования машин», «Основы проектирования машин», «Проектирование деталей приборов» и др. При этом сокращены некоторые разделы описательного характера и исправлены допущенные в 1-м издании ошибки и опечатки. Некоторые разделы переработаны с целью достижения большей ясности при изучении излагаемого материала. Учтены изменения, внесенные в некоторые стандарты, а справочные данные приведены в соответствие с современными требованиями нормативных документов.

Авторы выражают благодарность рецензентам – коллективу кафедры «Детали машин и ПТУ» Белорусского государственного технологического университета и доктору технических наук заведующему кафедрой «Сопротивление материалов и детали машин» Белорусского государственного аграрного технического университета А.Н. Орде – за ценные замечания и советы, способствовавшие улучшению содержания данной книги.

*А. Т. Скойбеда,*  
доктор технических наук,  
профессор

## Введение

Все без исключения машины и механизмы состоят из отдельных деталей. Детали не только составляют машины, но и определяют их работоспособность. Кроме деталей различают такие виды изделий, как сборочные единицы, комплекты и комплексы. Их определения даны в соответствии с ГОСТ 2.101–68.

*Деталь* – это изделие, изготавливаемое из однородного материала без сборочных или монтажных операций. К деталям относятся также изделия, изготовленные из однородного материала с применением сварки, пайки, сшивки, склеивания (например, трубка, спаянная или сваренная из куска листового материала).

В зависимости от выполняемых функций детали бывают простые и сложные. Простые детали (болт, гайка, зубчатое колесо) выполняют одну функцию. Сложные детали имеют несколько функциональных назначений (например, корпус редуктора является еще и масляной ванной).

*Сборочная единица* – изделие, состоящее из нескольких деталей, соединенных между собой с помощью сборочных или монтажных операций и имеющих общее функциональное назначение (подшипник, муфта, редуктор и др.).

*Комплексом* называется группа изделий, предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций, но не соединенных между собой (несобранная машина, поточная линия и др.).

*Комплектом* называется набор изделий, не связанных между собой функционально и сборочными операциями (комплекты запасных частей, инструмента, измерительной аппаратуры и др.).

Система взаимосвязанных сборочных единиц, предназначенная для преобразования и изменения движения, называется *механизмом* (кулисный, кулачковый, кривошипный и др.).

*Машиной* является совокупность механизмов, образующая функционально-замкнутую систему преобразования энергии, материалов или информации с целью частичной или полной замены производственных функций человека, облегчения его труда и повышения производительности.

В зависимости от выполняемых функций различают энергетические, предназначенные для преобразования энергии, и рабочие машины.

К энергетическим машинам относятся электродвигатели и электрогенераторы, двигатели внутреннего сгорания и паровые машины, турбины и гелиостанции.

Рабочие машины подразделяются на технологические и машины-орудия (металлорежущие станки, ковочные машины, прокатные станы и др.), транспортные (автомобили, тракторы, самолеты, тепловозы и др.) и транспортирующие машины (конвейеры, элеваторы, подъемные краны).

Отдельную группу составляют машины-автоматы, которые без участия человека выполняют все рабочие и вспомогательные операции технологического процесса.

Машины-автоматы, расположенные в технологической последовательности и автоматически воздействующие на предмет труда, составляют автоматические линии (цехи, заводы).

# ОСНОВЫ ТЕОРИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

## ■ Глава 1. Детали машин, их назначение и классификация

### 1.1. Рабочие поверхности деталей машин

В курсе «Детали машин и основы конструирования» приходится часто встречаться с понятием «поверхность»: поверхность трения, взаимодействие поверхностей, разрушение поверхности и т.д. В последнее время появились работы, в которых процессы трения, изнашивания и схватывания рассматриваются как взаимодействие поверхностей, обладающих определенными свойствами.

Рабочие поверхности всех деталей машин условно можно разделить на сопряженные (контактирующие) и несопряженные (неконтактирующие).

Сопряженные детали образуют со смежными деталями подвижные пары или неподвижные звенья с микроперемещениями, обусловленными деформированием граничных слоев.

Несопряженные поверхности большинства деталей – цилиндрические, конические или сферические, т. е. имеющие оси вращения и плоскости, а также различные их сочетания.

Сопряженные поверхности бывают совпадающими и несовпадающими. Примерами совпадающих поверхностей являются боковые грани шпонок и шпоночных пазов, направляющие столов и др. Совпадающими эти поверхности можно назвать условно, так как полного их прилегания добиться трудно из-за шероховатости и волнистости (рис. 1.1).

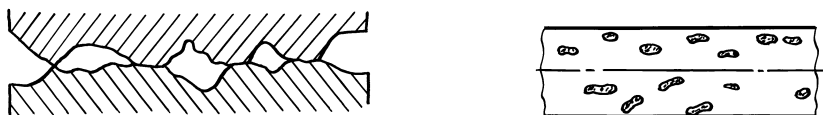


Рис. 1.1. Касание совпадающих поверхностей





Рис. 1.2. Примеры несовпадающих поверхностей

Несовпадающие поверхности имеют различную или разнонаправленную кривизну, например поверхности тел качения и дорожек внутренних и наружных колец в подшипниках качения, контактирующие поверхности зубьев зубчатых колес, винтовые пары качения и др. (рис. 1.2).

## 1.2. Классификация деталей машин

В зависимости от назначения и воспринимаемых нагрузок детали машин подразделяются на стержни, пластины, оболочки или их отдельные элементы. *Стержни*, или стержневые элементы, – это детали, поперечные размеры которых меньше продольных. *Пластины* имеют весьма малую толщину по сравнению с размерами в плане. *Оболочка* – это замкнутый элемент с весьма малой разностью наружного и внутреннего диаметров по сравнению с другими размерами.

По воспринимаемым нагрузкам детали машин, которые по конструктивному исполнению относятся к стержням, подразделяются на детали, нагруженные осевыми силами (ходовые винты, анкерные болты), крутящими и изгибающими моментами (валы, оси), крутящими моментами (торсионы) и др.

Пластины рассматриваются при изучении соединений (сварные, заклепочные, шпоночные, шлицевые), а также взаимодействия поверхностей, когда кривизна одной из них равна бесконечности ( $\rho = \infty$ ).

Оболочки (сосуды высокого давления, тонкостенные трубчатые элементы конструкций) в курсе деталей машин рассматриваются мало и являются предметом изучения специальных дисциплин.

По назначению детали машин условно могут быть разделены на следующие группы:

- детали соединений и передач (болты, винты, шпонки, шестерни, звездочки, шкивы, валы, муфты, подшипники и др.);
- детали для установки сборочных единицы (картеры, корпуса, станины и др.);
- детали смазочных, защитных и предохранительных устройств (сальники, защитные шайбы, сапуны и др.).

Изучение взаимодействия этих деталей, критериев их работоспособности, выбор материалов и, как результат, правильное построение машин и механизмов – основа курса «Детали машин и основы конструирования».

### 1.3. Требования к конструкции деталей машин. Критерии работоспособности

При создании новых машин к ним предъявляются следующие требования: высокая производительность и экономичность; надежность; простота управления и обслуживания; ремонтпригодность; удобство транспортировки; высокие эстетические качества.

Детали проектируемой машины должны прежде всего обладать достаточной прочностью, жесткостью и устойчивостью; быть долговечными, т. е. иметь достаточную износостойкость; удовлетворять заданным условиям работы — обладать тепло- и хладостойкостью, быть виброустойчивыми. Кроме того, должна допускаться возможность изготовления деталей из недорогостоящих и недефицитных материалов, они должны иметь рациональную конструктивную форму, воспроизводимую простейшими технологическими приемами, т. е. детали должны быть технологичными и удовлетворять требованиям эстетики, унификации и взаимозаменяемости.

Однако основные требования, предъявляемые к конструкции деталей машин, можно свести к двум — надежности и экономичности.

*Надежность* в соответствии с ГОСТ 27.0021–89 определяется как свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств.

Количественная характеристика надежности — вероятностная величина, ее расчет базируется на статистических данных, которые собираются в процессе эксплуатации машины. Иногда проводятся специальные испытания на надежность, достоверность которых зависит от числа образцов, подвергаемых испытанию. Так, если  $N_0$  — число испытанных образцов машин,  $N'_t$  — число образцов, по которым были отказы в работе за время  $t$ , а  $N'_t = N_0 - N'_t$  — количество образцов, прошедших испытания, вероятность безотказной работы

$$P(t) = N_t / N_0 = (N_0 - N'_t) / N_0 = 1 - F(t), \quad (1.1)$$

где  $F(t) = N'_t / N_0$  — вероятность отказов.

Из зависимости (1.1) следует, что вероятность безотказной работы, как правило, меньше единицы. В соответствии с положением о вероятности нескольких независимых событий надежность сложного изделия равна произведению надежностей отдельных элементов, входящих в систему.

Отсюда можно заключить, что надежность сложного изделия всегда будет меньше надежности самой ненадежной его детали и чем больше деталей или изделий входит в комплекс, тем меньше его надежность. Например, если машина состоит из 100 сборочных единиц, надежность каждой из которых  $F(t) = 0,99$ , то надежность машины  $F(t) = 0,99^{100} \approx 0,37$ . Такая машина не может быть допущена к эксплуатации вследствие низкой надежности. Из теории о долговечности машин известно, что надежность изделий со временем эксплуатации уменьшается по экспоненциальному закону  $P(t) = e^{-\lambda t}$ , где  $e$  – основание натурального логарифма;  $\lambda$  – интенсивность отказов;  $t$  – время эксплуатации.

Недостаточная надежность – основная преграда на пути внедрения сложных автоматических линий и комплексов. Основной характеристикой надежности можно считать *интенсивность отказов*  $\lambda$ , т. е. число отказов в единицу времени или на определенный объем выполняемой работы.

Величина, обратная интенсивности отказов, называется *наработкой на отказ*:  $m = 1/\lambda$ .

*Экономичность* – система мероприятий, обеспечивающих минимальные затраты на приобретение материалов и оборудования для изготовления деталей.

*Эстетичность* – соответствие форм и внешнего вида изделий требованиям рынка.

*Технологичность* – свойство объекта воспринимать наиболее экономичный и эффективный способ изготовления. Понятие «технологичность» является относительным, обусловливаемым уровнем производства завода-изготовителя.

*Ремонтпригодность* – приспособленность объекта к предупреждению причин его отказов и повреждений путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

*Отказ* – событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта.

*Безотказность* – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого срока службы или наработки (объема работы).

*Унификация деталей* – максимально возможная замена деталей различной формы и типоразмеров, имеющих одинаковое функциональное назначение, а также по возможности одинаковые требования по качеству рабочих поверхностей и упрочняющей технологии.

*Долговечность* – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

*Предельное состояние* – состояние объекта, при котором дальнейшая его эксплуатация невозможна из-за неизбежного нарушения заданных параметров или техники безопасности.

*Работоспособность* – состояние изделия (машины, деталей), при котором возможно выполнение заданных функций с параметрами, установленными нормативно-технической документацией (техническим заданием и др.).

В зависимости от функционального назначения и условий работы деталей их работоспособность оценивается по одному или группе показателей, основными из которых являются прочность, износостойкость, жесткость, теплостойкость, вибрационная устойчивость. Из всех показателей главным критерием работоспособности является прочность, так как детали прежде всего должны быть прочными.

*Прочность* – это способность деталей противостоять разрушению. Все детали под действием нагрузок меняют свою форму и размеры. При этом в них появляются внутренние напряжения, с увеличением которых может возникнуть опасное состояние детали, исключающее выполнение ее функции.

Прочность как способность детали сопротивляться разрушению оценивается с помощью допускаемых напряжений или запасов прочности. При этом расчеты на прочность базируются на теоретических и экспериментальных исследованиях взаимодействия деталей, свойств материалов, на передовых методах проектирования, изготовления и эксплуатации машин и механизмов.

Метод расчета по допускаемым напряжениям является наиболее распространенным при проектировании несложных, однотипных изделий. Согласно этому методу наибольшие напряжения в некоторой точке или сечении не должны превышать определенного значения, допустимого для принятого материала и вида изделия. Условия прочности по допускаемому напряжению имеют вид

$$\sigma \leq [\sigma], \quad \tau \leq [\tau],$$

где  $\sigma$  и  $\tau$  – соответственно нормальное и касательное расчетное напряжение в опасном сечении детали;  $[\sigma]$  и  $[\tau]$  – допускаемые напряжения для материала детали.

Расчеты по этому методу являются приближенными, так как в них не учитываются режим нагружения (скорость и характер приложения нагрузки), форма и состояние сопряженных поверхностей, однородность механических свойств материала, температура окружающей среды и другие факторы. Кроме того, допускаемые напряжения не отражают соотношения действующих и предельных напряжений материала детали. Эти факторы учитываются при расчете по запасам прочности, определяемым из соотношения

$$s = \sigma_{\text{пред}} / \sigma_{\text{max}},$$

где  $s$  – запас прочности;  $\sigma_{\text{пред}}$  – предельное напряжение (при постоянных нагрузках – предел прочности, при переменных – предел выносливости);  $\sigma_{\text{max}}$  – максимальное напряжение в опасном сечении.

*Износостойкость*, так же как и прочность, характеризует способность деталей сохранять размеры и форму. Однако в отличие от прочности износостойкость – это способность противостоять изнашиванию в результате трения. В теории трения и изнашивания [25] рассматриваются следующие основные виды изнашивания: механическое, коррозионно-механическое и молекулярно-механическое, абразивное, усталостное и др.

Для уменьшения изнашивания широко используются смазка трущихся поверхностей, защита от попадания абразивных частиц, а также специальные виды обработки сопряженных поверхностей.

Износостойкость деталей оценивается *интенсивностью изнашивания*, определяемой как отношение толщины снятого в результате изнашивания слоя  $h_L$  к пути трения  $L$  [29]:

$$I_h = h_L / L,$$

где  $I_h$  – интенсивность изнашивания;  $L$  – путь перемещения точки, в которой фиксируется износ, относительно сопряженных поверхностей.

Для несовпадающих сопряженных поверхностей интенсивность изнашивания зависит от числа вхождений каждой точки в зону контакта, т. е. от числа циклов нагружения  $N_c$ :

$$I_{N_c} = h_{N_c} / N_c,$$

где  $h_{N_c}$  – толщина слоя, снятого в результате изнашивания, при числе вхождений в зону контакта  $N_c$ .

При расчете долговечности деталей по критерию износостойкости используются эмпирические зависимости типа [29]

$$F^m L = C; \quad \sigma_H^m N_c = C,$$

где  $F$  – нормальная к поверхностям трения сила;  $m$  – показатель степени, при работе без смазочного материала  $m = 1$ , для смазанных поверхностей  $m = 3$ ;  $C$  – установленная для данного материала долговечность.

*Жесткость* – способность деталей под нагрузкой сохранять размеры и форму благодаря силам упругости. Расчет на жесткость является одним из основных расчетов, в нем предусматривается ограничение упругих перемещений деталей или отдельных элементов в допустимых пределах. Нормы жесткости устанавливаются на основе опыта эксплуатации и требований к конструкции. С применением высокопрочных

сталей расчеты на жесткость выдвигаются на первый план, так как при высоких характеристиках прочности показатели жесткости таких материалов остаются практически неизменными.

*Теплостойкость* – способность изделий сохранять работоспособность при изменении температуры. При нагревании может произойти понижение прочности материала и наблюдаться ползучесть, снижение защищающей способности масляной пленки, при переохлаждении – разрыв пленки вследствие загустения смазочного материала, изменение зазоров между контактирующими поверхностями и заклинивание сопряженных деталей.

*Виброустойчивость* – способность изделий сохранять работоспособность при воздействии знакопеременных нагрузок и колебаний с заданной частотой и амплитудой.

Вибрации вызывают дополнительные переменные напряжения и приводят к усталостному разрушению деталей. Иногда, например в металлорежущих станках, вибрации снижают качество обработки деталей, т. е. нарушают выполнение технологического процесса. Расчеты на колебания приобретают все большее значение и являются обязательными при проектировании высокоскоростных передач и приводов.

## **1.4. Методы изготовления и технологичность деталей машин**

Технологичность деталей является одним из важнейших условий создания машин. Технологичным называется изделие, изготовленное по наиболее эффективной технологии и удовлетворяющее заданным техническим требованиям. Существует много способов образования формы деталей. При выборе формы деталей учитывается их назначение и условия работы и определяется способ изготовления.

В машиностроении используются в основном два метода изготовления деталей: со снятием стружки (точение, строгание, фрезерование, шлифование) и без снятия стружки (литье и методы пластического деформирования – ковка, штамповка, прокатка, волочение). В последние годы широкое применение получили методы изготовления деталей максимально приближенными по форме к конечным размерам. Одним из таких методов является получение деталей из порошков (метод порошковой металлургии).

При выборе метода изготовления деталей важным критерием является масштаб производства.

Себестоимость деталей  $s_i$  в зависимости от масштаба производства определяется зависимостью

$$s_i = M_i + Z_i + O_i/n_i,$$

где  $M_i$  – стоимость материала;  $Z_i$  – затраты на изготовление одной детали;  $O_i$  – стоимость оснастки (инструмент, штампы, модели, станки и др.);  $n_i$  – масштаб производства (число изделий в партии).

Для обработки деталей резанием наиболее рациональными являются формы поверхностей, образуемые простым относительным движением детали и инструмента. При этом преобладают плоские, эвольвентные, круговые и конусные поверхности.

Метод изготовления деталей с удалением стружки нерационален и применяется при единичном и мелкосерийном производстве. При серийном и массовом производстве наиболее экономичным является формообразование деталей методом литья или пластического деформирования, что снижает расход материала и затраты электроэнергии.

Методом литья получают детали практически неограниченной сложности (блоки двигателей внутреннего сгорания, остовы машин, станины металлообрабатывающих станков и др.). Штамповкой, прокаткой, волочением изготавливают детали сравнительно простой конфигурации. Благодаря малым потерям материала, высокому уровню автоматизации пластическое деформирование при изготовлении деталей значительно превосходит другие методы. Так, в самолетах и автомобилях около 85 % деталей изготовлены методом штамповки.

Быстро развивающаяся в последние десятилетия у нас и за рубежом порошковая металлургия имеет большие преимущества перед всеми другими методами изготовления деталей. Этот метод удачно сочетает преимущества литья и штамповки и в то же время позволяет использовать удаленную стружку для изготовления из нее специальных порошков. Из порошков получают детали самой сложной конфигурации, и они, как правило, не нуждаются в дополнительной обработке. Применение специальных легирующих добавок и термической обработки позволяет получать детали, не уступающие по прочности изготовленным из компактного материала.

Как уже отмечалось ранее, технологичными являются конструкции, которые требуют наименьших затрат не только на изготовление, но и на сборку, эксплуатацию и ремонт. Известно, что на сборочные операции приходится до 50 % общей трудоемкости изготовления машин. Поэтому при проектировании необходимо стремиться к использованию стандартных деталей, применяемых в массовом производстве. Это способствует увеличению выпуска деталей и организации их специализированного производства с высокой степенью автоматизации.

При проектировании необходимо предусматривать удобство монтажных и демонтажных работ, по возможности исключение ручной пригонки деталей. Несложные компактные сборочные единицы должны быть удобны для автоматизированной сборки отдельных комплексов и машин. При этом следует стремиться к уменьшению числа деталей в сборочных единицах и к обеспечению легкого доступа к местам их крепления и обслуживания.

## ■ Глава 2. Взаимодействие сопряженных поверхностей

### 2.1. Виды сопряженных поверхностей

Поверхности взаимодействующих деталей, соприкасающиеся друг с другом непосредственно или через слой смазочного материала, называются *сопряженными (контактирующими)*. Как уже отмечалось ранее, сопряженные поверхности бывают совпадающими и несовпадающими. Надежность машин и механизмов в большой степени зависит от процессов, происходящих в граничных слоях этих поверхностей.

В соответствии с [25] граничный слой смазочного материала, разделяющий сопряженные поверхности, рассматривается как отдельная поверхность. В этом случае при трении контактирующих поверхностей взаимодействуют три, а точнее, четыре поверхности (рис. 2.1). На рис. 2.1 показаны сопряженные поверхности 1, 5, разделенные слоем жидкости 3. Граничные слои 2, 4 обуславливают характер граничного трения. В случае жидкостного трения сопротивление относительному движению поверхностей 1, 5 оказывают внутренние силы трения в слоях 2, 4.

При взаимодействии деталей без масляного слоя передача нагрузки происходит по небольшим площадкам. Материал деталей в этом случае находится в сложном объемном напряженном состоянии, которое поддается исследованию методами теории упругости. Эти напряжения называются *контактными напряжениями*. Они быстро убывают при удалении от места контакта, поэтому их часто называют *местными напряжениями*.

Поверхность контакта при первоначальном касании в точке ограничена эллипсом, уравнение которого

$$Ax^2 + By^2 = C, \quad (2.1)$$

где  $A$  и  $B$  – коэффициенты, зависящие от главных радиусов кривизны сопряженных поверхностей;  $C$  – перемещение контактирующих тел вследствие упругой деформации.

Напряжения по площадке контакта распределяются по закону эллипсоида:

$$\sigma_{\max} = 2F/(3\pi ab),$$

где  $F$  – нагрузка на контакт;  $a, b$  – полуоси эллипса касания, величина которых зависит от отношения  $A/B$  (табл. 2.1).

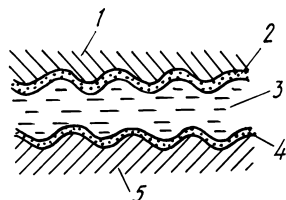


Рис. 2.1. Схема сопряженных поверхностей



Принято считать, что при совпадающих сопряженных поверхностях нагрузка равномерно распределена по площадке контакта и интенсивность нормальных к ней сил характеризуется давлением  $p$ , приходящимся на единицу площади, значение которого не должно превышать допустимого значения  $[p]$ , т. е.

$$p = F/A \leq [p].$$

При отсутствии относительных перемещений сопряженных поверхностей интенсивность нормальных давлений называется *напряжением смятия*  $\sigma_{\text{см}}$ . Их считают равномерно распределенными по всей поверхности контакта.

При несовпадающих сопряженных поверхностях интенсивность давлений зависит от удаления от центра контакта.

Наибольшие напряжения в соответствии с теорией Герца в центре эллипса:

$$\sigma_{\text{max}} = \alpha \sqrt[3]{4FA^2E^2},$$

где  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от отношения  $A/B$ ;  $E$  – приведенный модуль упругости материала контактирующих тел.

Значения коэффициента  $\alpha$  в центре касания приведены ниже [3]:

$A/B$	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
$\alpha$	0,388	0,420	0,468	0,530	0,716	0,970	1,280	1,800	2,271

Немецкий физик Герц в 1882 г. опубликовал полученные им зависимости для расчета напряжений и деформаций при контакте двух упругих тел с поверхностями произвольной кривизны. На основании теории потенциалов упругого полупространства, ограниченного плоской поверхностью, и математической теории, описывающей геометрию криволинейных поверхностей, было установлено, что площадка контакта двух криволинейных поверхностей имеет форму эллипса, величины полуосей которого зависят от радиусов кривизны контактирующих тел. Используя аналогию между упругими деформациями под давлением, распределенным по поверхности полупространства, и электрическим потенциалом, создаваемым распределенным электрическим зарядом, Герц предложил закон распределения нормальных перемещений внутри зоны, ограниченной эллипсом с полуосями  $a$  и  $b$ , который можно представить в виде уравнения (2.1).

В табл. 2.1 даны наиболее характерные виды несовпадающих сопряженных поверхностей и формулы расчетов коэффициентов  $A$  и  $B$ , а также наибольших напряжений в центре касания  $\sigma_{\text{max}}$ , полученных на основании контактной теории упругости Герца.

# Оглавление

Предисловие .....	3
Введение .....	5
<b>Раздел I. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН</b> .....	7
■ <b>Глава 1. Детали машин, их назначение и классификация</b> .....	7
1.1. Рабочие поверхности деталей машин .....	7
1.2. Классификация деталей машин .....	8
1.3. Требования к конструкции деталей машин. Критерии работоспособности .....	9
1.4. Методы изготовления и технологичность деталей машин .....	13
■ <b>Глава 2. Взаимодействие сопряженных поверхностей</b> .....	15
2.1. Виды сопряженных поверхностей .....	15
2.2. Взаимодействие и изнашивание сопряженных поверхностей. Влияние параметров поверхности на прочность деталей машин .....	19
2.3. Влияние параметров поверхности контакта на прочность деталей машин .....	26
2.4. Виды трения и влияние смазки на износ и работоспособность деталей машин .....	36
2.5. Основы теории гидродинамической смазки .....	40
■ <b>Глава 3. Виды нагрузок и методы расчета деталей машин</b> .....	42
3.1. Виды нагрузок и их распределение .....	42
3.2. Статическая прочность деталей машин .....	44
3.3. Переменные нагрузки и их влияние на прочность деталей .....	47
3.4. Сопротивление усталости деталей машин .....	49
3.5. Виды расчетов на сопротивление усталости .....	55
3.6. Вероятностные методы расчета и надежность деталей машин .....	62
■ <b>Глава 4. Материалы и допускаемые напряжения</b> .....	70
4.1. Общие сведения .....	70
4.2. Материалы сопряженных трущихся поверхностей .....	74
4.3. Допускаемые напряжения и запасы прочности .....	75
<b>Раздел II. ОСНОВЫ ТЕОРИИ И РАСЧЕТА СОЕДИНЕНИЙ</b> .....	82
■ <b>Глава 5. Сварные, паяные, клеевые и заклепочные соединения</b> .....	82
5.1. Общие сведения о соединениях .....	82
5.2. Сварные соединения .....	84

5.3. Основные виды сварных швов и соединений .....	87
5.4. Критерии работоспособности и расчета сварных соединений.....	90
5.5. Основы теории и расчета сварных соединений.....	92
5.6. Расчет сварных соединений при постоянных нагрузках .....	95
5.7. Расчет сварных соединений при переменных нагрузках .....	102
5.8. Паяные и клеевые соединения.....	103
5.9. Заклепочные соединения .....	105
<b>■ Глава 6. Резьбовые соединения .....</b>	<b>110</b>
6.1. Основные определения .....	110
6.2. Теория винтовой пары.....	112
6.3. Распределение осевой нагрузки между витками резьбы .....	119
6.4. Расчет элементов резьбы на прочность .....	121
6.5. Резьбовые соединения .....	124
6.6. Классы прочности и материалы деталей резьбовых соединений. ....	138
6.7. Фрикционно-винтовые соединения .....	140
<b>■ Глава 7. Соединения с натягом, шпоночные, шлицевые и профильные .....</b>	<b>145</b>
7.1. Общие сведения, основные виды и области применения соединений с натягом. Виды нагружений .....	145
7.2. Расчет соединений с натягом .....	148
7.3. Проблемы повышения работоспособности соединений с натягом. Контроль качества .....	152
7.4. Шпоночные соединения .....	154
7.5. Шлицевые соединения .....	156
7.6. Профильные соединения .....	160
<b>Раздел III. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕДАЧИ, ДЕТАЛИ ПЕРЕДАЧ .....</b>	<b>163</b>
<b>■ Глава 8. Кинематические и энергетические характеристики механических передач.....</b>	<b>163</b>
8.1. Общие сведения. Кинематические и энергетические соотношения.....	163
8.2. Выбор двигателей механических передач.....	166
<b>■ Глава 9. Фрикционные и ременные передачи.....</b>	<b>168</b>
9.1. Физические основы передачи нагрузки поверхностями трения .....	168
9.2. Геометрическое скольжение во фрикционной передаче .....	173
9.3. Теория ременной передачи .....	176
9.4. Схемы, конструкции и расчет фрикционных передач и вариаторов .....	183
9.5. Плоскоремные передачи. Геометрия, кинематика, материалы ремней, расчет .....	187
9.6. Передачи клиновыми и поликлиновыми ремнями.....	191
<b>■ Глава 10. Зубчатые передачи.....</b>	<b>193</b>
10.1. Общие сведения и область применения .....	193
10.2. Стандартные элементы цилиндрических зубчатых колес .....	197
10.3. Параметры эвольвентной цилиндрической передачи внешнего и внутреннего зацепления .....	198
10.4. Зубчатые колеса и передачи со смещением .....	203
10.5. Точность зубчатых и червячных передач .....	211
10.6. Скорость скольжения профилей зубьев. КПД передачи. Смазывание и охлаждение. Понятие о контактно-гидродинамической теории смазывания .....	214
10.7. Виды повреждения зубьев .....	219
10.8. Расчетная нагрузка.....	222

10.9. Проектировочный и проверочный расчеты на контактную усталость активных поверхностей зубьев .....	233
10.10. Проектировочный и проверочный расчеты на сопротивление усталости зубьев при изгибе .....	243
10.11. Конические зубчатые передачи. Общие сведения и область применения .....	248
10.12. Расчет основных геометрических параметров .....	251
10.13. Конические зубчатые передачи со смещением .....	253
10.14. Силы, действующие в коническом зубчатом зацеплении .....	257
10.15. Проектировочный и проверочный расчеты конических зубчатых передач на контактную усталость активных поверхностей зубьев .....	259
10.16. Проектировочный и проверочный расчеты на сопротивление усталости зубьев при изгибе .....	266
10.17. Материалы зубчатых колес и термообработка .....	269
10.18. Допускаемые напряжения .....	274
10.19. Особенности расчета передач, работающих в условиях абразивного изнашивания .....	283
10.20. Передачи с круговинтовым зацеплением Новикова .....	284
10.21. Краткие сведения о винтовых и гипоидных передачах .....	292
<b>■ Глава 11. Планетарные и волновые зубчатые передачи .....</b>	<b>294</b>
11.1. Общие сведения и область применения планетарных передач .....	294
11.2. Классификация и обозначение планетарных передач .....	295
11.3. Кинематика планетарных передач .....	297
11.4. Кинематика дифференциальных механизмов .....	301
11.5. Силы в зацеплении и КПД планетарных передач .....	303
11.6. Геометрия планетарных передач .....	311
11.7. Расчет на прочность планетарных передач .....	315
11.8. Общие сведения и область применения волновых передач .....	317
11.9. Кинематика волновых передач .....	319
11.10. Выбор параметров зацепления волновых передач .....	321
11.11. Расчет волновых передач .....	324
<b>■ Глава 12. Червячные передачи .....</b>	<b>329</b>
12.1. Общие сведения .....	329
12.2. Геометрические параметры червяков, червячных колес и передач .....	333
12.3. Кинематика червячной передачи. Скольжение в зацеплении и КПД передачи .....	339
12.4. Проектировочный и проверочный расчеты на сопротивление усталости активных поверхностей зубьев червячного колеса .....	341
12.5. Проверочный расчет зубьев на сопротивление усталости при изгибе .....	347
12.6. Материалы и термообработка. Допускаемые напряжения .....	348
12.7. Тепловой расчет, смазывание и охлаждение червячных передач .....	351
12.8. Краткие сведения о глобоидной передаче .....	354
<b>■ Глава 13. Передачи зацеплением гибкими связями .....</b>	<b>355</b>
13.1. Общие сведения .....	355
13.2. Анализ работы цепной передачи. Силы в передаче. Критерии работоспособности .....	358
13.3. Проектирование цепных передач .....	363
13.4. Особенности работы и проектирование передач зубчатым ремнем .....	366
<b>■ Глава 14. Передача винт – гайка .....</b>	<b>369</b>
14.1. Общие сведения .....	369
14.2. Конструкция винтовой пары .....	370
14.3. Кинематика и силовой расчет передачи .....	372
14.4. Расчет передачи винт – гайка .....	374

■ <b>Глава 15. Валы и оси</b> .....	378
15.1. Общие сведения .....	378
15.2. Материалы и термообработка валов и осей .....	380
15.3. Критерии работоспособности .....	381
15.4. Проектный расчет валов .....	381
15.5. Расчет на сопротивление усталости .....	385
15.6. Рекомендации по повышению сопротивления усталости валов и осей .....	390
15.7. Расчет на статическую прочность .....	392
15.8. Расчет валов на жесткость .....	392
15.9. Расчет осей .....	394
15.10. Расчет валов и осей на колебания .....	395
15.11. Вероятностный расчет валов на сопротивление усталости .....	397
■ <b>Глава 16. Подшипники скольжения</b> .....	397
16.1. Общие сведения. Конструкции. Материалы. Области применения .....	397
16.2. Виды трения и критерии расчетов подшипников скольжения .....	402
16.3. Упрощенный (условный) расчет подшипников скольжения .....	403
16.4. Расчет подшипников скольжения жидкостного трения .....	404
16.5. Гидростатические и аэростатические подшипники и подпятники .....	408
16.6. Учет рассеивания зазоров в гидродинамическом радиальном подшипнике скольжения .....	412
■ <b>Глава 17. Подшипники качения</b> .....	416
17.1. Общие сведения и классификация .....	416
17.2. Основные типы подшипников качения и их характеристика. Система обозначений .....	417
17.3. Распределение нагрузки между телами качения .....	420
17.4. Виды разрушений и критерии расчета подшипников качения .....	421
17.5. Расчет на долговечность .....	422
17.6. Расчет по статической грузоподъемности .....	425
17.7. Некоторые случаи расчета подшипников качения для специфических условий их эксплуатации .....	425
17.8. Потери на трение в подшипниках .....	428
17.9. Посадки подшипников .....	429
■ <b>Глава 18. Муфты</b> .....	431
18.1. Общие сведения. Область применения, классификация и выбор муфт .....	431
18.2. Глухие муфты .....	432
18.3. Компенсирующие муфты .....	433
18.4. Сцепные муфты .....	437
18.5. Предохранительные муфты .....	440
18.6. Муфты свободного хода .....	442
■ <b>Глава 19. Пружины</b> .....	451
19.1. Общие сведения, назначение и классификация .....	451
19.2. Основы теории винтовых цилиндрических пружин растяжения и сжатия .....	453
19.3. Материалы и допускаемые напряжения .....	455
19.4. Методика расчета винтовых цилиндрических пружин .....	456
19.5. Тарельчатые пружины .....	459
■ <b>Глава 20. Корпусные детали</b> .....	464
20.1. Общие сведения и классификация .....	464
20.2. Конструирование литых и сварных корпусных деталей .....	466
20.3. Направляющие .....	469

<b>Раздел IV. ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫЕ МАШИНЫ</b> .....	474
■ <b>Глава 21. Введение, классификация подъемно-транспортных машин, основные требования и пути развития</b> .....	474
21.1. Роль подъемно-транспортных машин и краткая история их развития .....	474
21.2. Классификация подъемно-транспортных машин. Основные типы грузоподъемных машин .....	475
21.3. Стандартизация ПТМ. Основные требования к машинам.....	478
■ <b>Глава 22. Машины непрерывного транспорта</b> .....	479
22.1. Общие сведения. Производительность.....	479
22.2. Мощность привода конвейеров. Тяговый расчет.....	481
22.3. Ленточные конвейеры .....	483
22.4. Цепные, пластинчатые и подвесные конвейеры. Сопротивление движению .....	485
22.5. Элеваторы .....	487
22.6. Гравитационные устройства .....	489
■ <b>Глава 23. Машины циклического действия</b> .....	490
23.1. Основные параметры грузоподъемных машин .....	490
23.2. Расчетные нагрузки .....	492
23.3. Правила устройства и безопасной работы грузоподъемных кранов .....	495
23.4. Общее уравнение движения. Определение приведенных моментов инерции .....	496
23.5. Остановы и тормоза .....	501
23.6. Механизмы подъема груза и изменения вылета стрелы .....	505
23.7. Механизмы передвижения .....	523
23.8. Механизмы поворота кранов .....	528
■ <b>Глава 24. Промышленные роботы</b> .....	533
24.1. Область применения и характеристики промышленных роботов .....	533
24.2. Устройство ПР. Регламентированные параметры и нормы. Системы управления.....	534
24.3. Приводы механизмов роботов и их основные технические характеристики .....	538
24.4. Захваты, способы действия. Конструкции захватов .....	539
■ <b>Глава 25. Средства механизации автоматизированного производства</b> .....	541
25.1. Комплексная механизация. Роль переместительных операций в автоматизированном производстве и способы их осуществления .....	541
25.2. Устройства, обслуживающие автоматические линии и гибкие технологические системы .....	543
25.3. Транспортные устройства, обслуживающие литейное и кузнечно-штамповочное производство .....	545
Литература .....	550
Предметный указатель.....	552