

Министерство образования и науки Украины
Сумский государственный университет

Пчелинцев В. А., Раб В. Н.

**ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ОСНОВНЫХ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

*Рекомендовано ученым советом
Сумского государственного университета
в качестве учебно-методического пособия*

Сумы
Изд-во СумГУ
2008

УДК 620.18/19(075.8)
П 92

*Рекомендовано до друку вченою радою
інженерного факультету
Сумського державного університету
(протокол № 3 від 19.09. 2007 р.)*

Рецензенти:

канд. техн. наук, проф. І.Б.Карінцев
(Сумський державний університет)
канд. техн. наук, доц. О.І. Акілов
(Сумський державний університет)

Пчелінцев В.О., Раб В.М.

П 92 Пошкоджуваність основних деталей машин:
Навчально-методичний посібник. –Суми:
Вид-во СумДУ, 2008. -137 с. Російською мовою.

Посібник містить відомості про основні види руйнування деталей машин і механізмів, які спричиняють відмову у роботі технологічного обладнання, що завдає збитки підприємствам. Наведені схеми руйнування деталей машин. Описані вимоги до матеріалу деталей машин для забезпечення їх надійної роботи в період експлуатації. У посібнику подані методичні рекомендації і приклад виконання курсової роботи «Дослідження причин руйнування деталей машин – колінчастого валу».

Для студентів-матеріалознавців, що вивчають дисципліни «Механічні властивості та конструкційна міцність металів», «Методи структурного аналізу матеріалів».

УДК 620.18/19(075.8)

© В.О.Пчелінцев, В.М.Раб, 2008

© Вид-во СумДУ, 2008

Содержание

	С.
Введение.....	5
1 Основные сведения о машинах и механизмах.....	7
2 Условия работы деталей машин.....	18
3 Червячная передача.....	24
3.1 Общая характеристика, условия работы и область применения.....	24
3.2 Возможные причины отказа.....	29
3.3 Методы повышения работоспособности.....	33
4 Валы вращения.....	36
4.1 Общая характеристика, условия работы и область применения.....	36
4.2 Возможные причины отказа.....	40
4.3 Методы повышения работоспособности.....	45
5 Зубчатая передача.....	48
5.1 Общая характеристика, условия работы и область применения.....	48
5.2 Возможные причины отказа.....	52
5.3 Методы повышения работоспособности.....	55
6 Подшипники качения.....	57
6.1 Общая характеристика, условия работы и область применения.....	57
6.2 Возможные причины отказа.....	62
6.3 Методы повышения работоспособности.....	65
7 Цепная передача.....	68
7.1 Общая характеристика, условия работы и область применения.....	68
7.2 Возможные причины отказа.....	71
7.3 Методы повышения работоспособности.....	73
8 Упругие элементы машин.....	75
8.1 Общая характеристика, область применения и условия эксплуатации упругих элементов.....	75
8.2 Возможные причины отказа упругих элементов.....	79

8.3 Методы повышения работоспособности.....	89
9 Основные способы повышения усталостной прочности элементов конструкций.....	90
10 Методические рекомендации к выполнению работы «Исследование причин отказов деталей машин».....	95
Приложение А. Пример выполнения ОДЗ.....	102
Список литературы.....	136

ВВЕДЕНИЕ

Одним из обязательных требований при конструировании и производстве современного оборудования является увеличение его производительности. Повышение загрузки и напряженности эксплуатации машин не может не сказаться на их надежности, поскольку повышение скоростей относительных перемещений контактирующих деталей, повышенные силовые и температурные нагрузки быстрее исчерпывают первоначальные, созданные на стадии изготовления, рабочие ресурсы. Для отказа машины в целом достаточно потери работоспособности лишь у одной детали.

Интенсификация рабочих режимов и тяжелые эксплуатационные условия создают предпосылки для быстрого выхода из строя отдельных деталей машин. Во многих случаях надежность машин достигается в первую очередь путем обеспечения объемной и поверхностной прочности материалов при действии нагрузок, среды и температуры. Процессы объемного разрушения протекают в результате накопления в объеме материала дефектов его структуры, приводящих к акту макроскопического разрушения. Процессы поверхностного разрушения состоят из большого количества микроскопических актов разрушения, проявляющихся в постепенном уменьшении объема металла – износе. В процессе эксплуатации поверхностный слой детали подвергается наиболее сильному механическому, тепловому, химическому и другим видам воздействия. Потеря деталью работоспособности в большинстве случаев происходит с поверхности в результате изнашивания изделий, эрозии, коррозии, термопластических эффектов и т.д.

Поэтому значительный ресурс повышения работоспособности заключен в материале, из которого изготавливаются элементы конструкции. Развитие новых методов поверхностной обработки материалов позволяет получать

заданный комплекс характеристик поверхностной прочности. При рассмотрении вопросов о работоспособности и долговечности необходимо принимать во внимание целый спектр технологических, эксплуатационных, конструкционных, экономических, металлофизических и др. факторов.

В предлагаемом пособии приведены основные виды повреждаемости (отказов) в процессе эксплуатации основных элементов машин. Изложенный материал предназначен для самостоятельной работы студентов при изучении дисциплин «Механические свойства и конструкционная прочность», а также при выполнении курсовой работы по дисциплине «Методы структурного анализа».

1 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МАШИНАХ И МЕХАНИЗМАХ

В современном производстве используются разнообразные механизмы и машины.

Механизм – это устройство для передачи или преобразования движения и скорости.

Машиной называется несколько соединенных между собой механизмов, предназначенных для выполнения полезной работы, связанной с процессом производства, передачи или преобразования энергии.

Каждый машинный агрегат (несколько устройств соединенных в одно целое, для производства общей работы) состоит, по сути, из трех частей: *машины-двигателя, передаточного механизма и машины-орудия, или рабочей машины*. Машина-двигатель и передаточный механизм служат для приведения в движение рабочей машины.

Машины-двигатели служат для преобразования одного вида энергии в другой. Характерными примерами машин-двигателей могут быть: паровая машина и паровая турбина, в которой тепловая энергия пара преобразуется в механическую работу; двигатель внутреннего сгорания, в котором тепловая энергия топлива преобразовывается в механическую; электродвигатель, ветряной двигатель и т.д.

Полученная энергия передается на машину-орудие при помощи передаточного механизма – ременной передачи, зубчатых колес, валов и т. п.

Рабочая машина действует непосредственно на предмет труда. Если внимательно присмотреться, то в ней всегда можно различить, хотя и в измененной форме, те же приспособления, которые используются при ручном труде.

Если рабочая машина снабжена механизмами, выполняющими вспомогательные операции без непосредственного участия человека (подвод и отвод рабочих органов, установка обрабатываемых изделий и снятие их, переключение режи-

ма работы и др.), то она называется *автоматической*. Рабочие машины, в которых механизмы и агрегаты размещены в технологической последовательности и автоматически обрабатывают объекты труда, называются *комбайнами*.

Примером машины является токарный станок. Он состоит из двух основных механизмов, с помощью которых обрабатываемая заготовка получает вращение - главное движение, а резец - перемещение - подачу.

В результате осуществления этих движений из заготовки режущими инструментами срезается слой металла (припуск). Любая машина, в том числе и токарный станок, состоит из большего или меньшего количества деталей, связанных между собой в узлы. *Деталью* называются отдельные неразъемные части и их простейшие соединения в машинах, приборах и различных устройствах.

Требования, предъявляемые к машинам. При проектировании и создании машин учитываются определенные особенности, которые являются характерными для данного типа машин и условий их работы. Например, при проектировании двигателя внутреннего сгорания исходят из заданной мощности, назначения, числа оборотов в минуту, вида топлива и ряда других данных, характерных только для двигателя внутреннего сгорания и условий, в которых он будет работать.

При проектировании генератора электрической энергии исходят из заданной мощности, рабочего напряжения и назначения генератора.

В зависимости от назначения и условий работы к машинам одного и того же типа могут предъявляться различные требования. Например, требования, предъявляемые к автомобильному двигателю, существенно отличаются от требований, предъявляемых к авиационному двигателю. Основное же назначение генераторов электрической энергии, устанавливаемых на электростанциях и тепловозах, одинаково и заключается в преобразовании механической энергии в электрическую, но цель их назначения

различна: соответственно с этим различны и рабочие характеристики, и габаритные размеры, и конструктивное оформление.

Наряду с этим имеется ряд требований, которые в одинаковой мере относятся ко всем машинам и механизмам независимо от их назначения, сложности и условий работы. К таким требованиям относятся прежде всего простота устройства, прочность и долговечность, высокая экономичность, простота и удобство обслуживания, гарантия безопасности обслуживающего персонала, невысокая стоимость, красивый внешний вид (дизайн).

Механизмы преобразования движения – это механизмы, которые преобразуют вращательные и колебательные движения в поступательные и наоборот. К числу наиболее распространенных механизмов преобразования движения относятся кривошипно-шатунный, кулисный, эксцентриковый и кулачковый механизмы.

Кривошипно-шатунный механизм входит в состав различных поршневых машин: паровых, двигателей внутреннего сгорания, насосов и др. Он предназначен для преобразования возвратно-поступательного движения во вращательное и наоборот. Примером первого преобразования может быть механизм паровой машины паровоза.

Примером второго преобразования может быть кривошипно-шатунный механизм поршневого компрессора. Здесь вращательное движение вала преобразуется в возвратно-поступательное движение поршня.

Кулисный механизм является видоизменением кривошипно-шатунного и применяется как парораспределительный механизм в паровозах, в поперечно-строгальных станках и т. п. В кулисном механизме, как и в кривошипно-шатунном, равномерное вращательное движение колеса преобразуется в неравномерное возвратно-поступательное движение рабочего инструмента. Харак-

терной особенностью этого механизма является то, что за один оборот колеса рабочий инструмент делает два хода с различными скоростями.

Эксцентрикковые механизмы служат для преобразования вращательного движения в возвратно-поступательное.

Главной частью эксцентрикового механизма является эксцентрик – круглый диск, жестко насаженный на вал. Геометрическая ось вала не совпадает с центром диска, вследствие чего механизм и получил название эксцентрикового.

Обычно эксцентрикковые механизмы применяются в случаях, когда ползун должен перемещаться на незначительные расстояния (например, в парораспределительных, смазочных механизмах и т. п.).

Кулачковые механизмы служат для преобразования вращательного движения в поступательное, скорость которого изменяется по определенному, заранее заданному закону. Принцип действия кулачкового механизма аналогичен принципу действия эксцентрикового механизма, но кулачок может иметь разнообразную форму, зависящую от заданного закона изменения скорости и ускорения стержня. Рабочий ход стержня осуществляется кулачком, а обратный – пружиной. Кулачковые механизмы широко применяются в различных машинах как распределительные органы (например, в системе питания и зажигания двигателей внутреннего сгорания и т. д.).

В каждой машине имеются различные механизмы, которые выполняют те или иные функции. Независимо от большого разнообразия конструктивных форм механизмов их можно подразделять на следующие четыре группы:

а) винтовые механизмы, которые широко применяются в механике. К ним относятся, например, механизмы продольных и поперечных подач и задней бабки токарного станка;

б) плоские шарнирные механизмы - кривошипно-шатунные и кулисные, широко применяемые в станкостроении;

в) кулачковые механизмы и зубчатые колеса, применяемые в копировальных станках и других машинах;

г) фрикционные, ременные и другие передачи трения, широко применяемые в прессах, грузоподъемных машинах и т. п.

Рассматривая любую машину и мысленно разбирая ее на составные части, мы прежде всего встретимся с соединениями узлов и деталей. Соединения деталей разделяются на *неразъемные* (заклепочные, сварные и т. п.) и *разъемные* (болтовые, клиновые, шпоночные и т. п.), которые можно разобрать, не разрушая соединяемых деталей. Кроме того, в каждой машине есть детали, служащие для поддержания других деталей, закрепления их в заданном положении и для передачи вращающих моментов. Это так называемые оси, валы, подшипники, подпятники и муфты.

Для передачи вращательного движения и вращающих моментов в машинах имеются узлы, состоящие из нескольких деталей. Это передаточные механизмы, или передачи, которые подразделяются на фрикционные, зубчатые, червячные, ременные и цепные.

Для предупреждения самоотвинчивания гаек применяют различные приспособления — гаечные замки.

Простейшим замком является вторая гайка, так называемая контргайка.

Клиновое соединение обычно состоит из стержня, клина и втулки. Для разборки клинового соединения необходимо выбить клин, соединяющий стержень и втулку.

Шпонки служат для жесткого соединения вращающихся или качающихся деталей с валами или осями. На рис. 1 а представлено шпоночное соединение зубчатого

колеса с валом при помощи так называемой клиновой шпонки - стального брусочка клинообразной формы. Существует несколько разновидностей шпонок, различающихся между собой по конструкции и принципу действия. При разборке клиновую шпонку выбивают молотком со стороны узкого ее конца при помощи стальной выколотки.

Шлицевые соединения (рис. 1 б) представляют собой многошпоночные соединения. Такие соединения обеспечивают точную центральную посадку деталей на вал, что не всегда бывает при шпоночном соединении, и меньше ослабляют вал, чем врезные шпонки. Шлицевое соединение может быть подвижным, если детали, насаженные на вал, свободно перемещаются вдоль оси вала, и неподвижным, если детали жестко закреплены на валу.

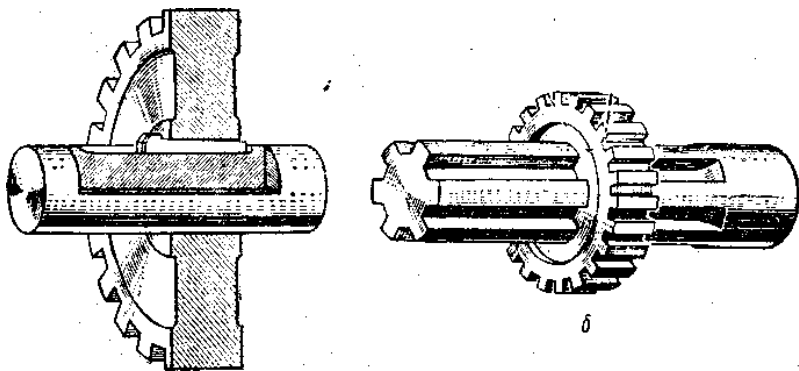


Рисунок 1 - Шпоночное (а) и шлицевое (б) соединения

Для поддержания вращающихся частей станков применяют оси и валы.

Отличие между осью и валом заключается лишь в характере выполняемой работы. Ось является только поддерживающей деталью, а вал, кроме того, передает усилия.

Оси бывают неподвижные, на которых вращаются поддерживаемые детали (например, оси колес), и вращающиеся,

на которых поддерживаемые детали жестко закрепляются и ось вращается вместе с ними (например, вагонная ось с жестко закрепленными на ней колесами).

По характеру работы валы разделяются на коренные, передаточные и трансмиссионные. Часть вала, размещенная непосредственно на опоре, называется *цанфой*.

Опоры осей и валов в зависимости от направления действующих сил разделяются на подшипники и подпятники. *Подшипниками* называются опоры, нагруженные поперечными силами, а *подпятниками* - опоры, нагруженные осевыми силами. В зависимости от характера трения рабочих элементов различают опоры трения скольжения и трения качения. Простейший подшипник трения скольжения представляет собой утолщение станины, в котором сделано отверстие.

Для сохранения вала материал подшипника подбирают таким, чтобы износ вала был минимальным.

На рисунке 2 *a* показан так называемый нормальный подшипник скольжения, который состоит из чугунного корпуса 2, крышки 4 и вкладыша, имеющего две половинки 3 и 5. Корпус подшипника прикрепляют болтами 1 к основанию, затем укладывают нижнюю половинку вкладыша, на нее - вал и, наконец, крышку с верхней половинкой вкладыша, которую зажимают болтами 7. Для подвода смазки в крышке и в верхней половинке вкладыша сделано сквозное отверстие, а в приливе крышки - небольшой резервуар 6 для смазки.

Подшипники качения имеют преимущества по сравнению с подшипниками скольжения, а именно: уменьшаются потери на трение (из физики известно, что коэффициент трения качения значительно меньше коэффициента трения скольжения), расход смазки и расходы, связанные с обслуживанием подшипников.

На рисунке 2 б представлен наиболее распространенный подшипник трения качения. Между двумя стальными закаленными кольцами 1 и 2 размещены стальные закаленные шарики 3, свободно катящиеся в желобках колец. Для того чтобы во время работы шарики не скатывались в одно место и не касались друг друга, служит сепаратор 4, представляющий собой обойму из мягкой стали или (реже) из латуни. Основными элементами подшипников качения являются промежуточные тела, по которым перекатываются кольца. В зависимости от формы этих тел подшипники бывают *шариковые*, *роликовые* и *игольчатые*. Подшипники качения в зависимости от количества рядов промежуточных тел подразделяются на *однорядные* и *двухрядные*.

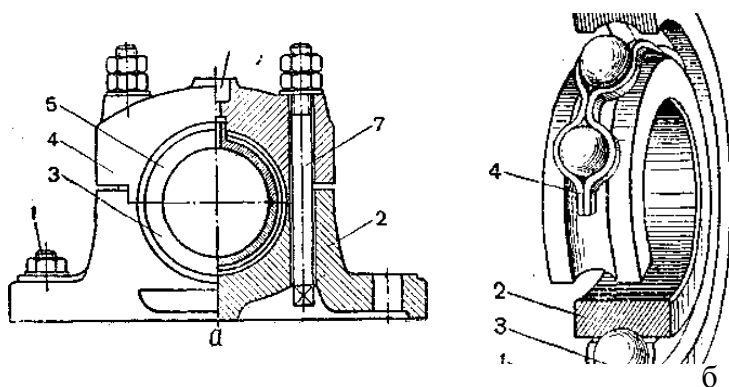


Рисунок 2. Подшипники: а - скольжения; б - качения

Для соединения валов машин и для передачи вращающего момента служат муфты. В зависимости от назначения и характера работы муфты имеют разнообразные конструкции.

Как уже было сказано, энергия от двигателя к рабочей машине подводится при помощи различных передач. Существуют механическая, гидравлическая, пневматиче-

ская и другие виды передач. Мы рассмотрим только механические передачи.

Механические передачи бывают с непосредственным касанием рабочих деталей, закрепленных на валах, - фрикционная, зубчатая, червячная, а также с гибкой связью между рабочими деталями - ременная, канатная и цепная.

Валы, передающие движение, называются *ведущими*, а валы, воспринимающие движение, - *ведомыми*.

Основной, важнейшей характеристикой каждой механической передачи является *передаточное число* - отношение числа оборотов ведущего вала к числу оборотов ведомого вала:

$$i = \frac{n_1}{n_2},$$

где i – передаточное число;

n_1 – число оборотов ведущего вала в минуту;

n_2 – число оборотов ведомого вала в минуту.

Фрикционная передача осуществляется за счет трения между двумя соприкасающимися гладкими катками. Если ведущий каток с некоторой силой прижать к ведомому и вращать, то последний, вследствие возникновения сил трения, также начнет вращаться и будет передавать движение рабочей машине.

Фрикционные передачи применяются не только при параллельном размещении осей валов, но и при пересекающихся осях с коническими катками. Такая передача называется *конической*.

Существенным недостатком фрикционных передач является непостоянство передаточного числа в результате взаимного проскальзывания катков.

В зубчатых передачах усилия от ведущего вала к ведомому передаются *зубчатыми колесами*. Колеса передачи между параллельными валами называются *цилин-*

дрическими, между пересекающимися - *коническими*, а колеса для передачи усилия между перекрещивающимися валами - *винтовыми*. Передавать движение между перекрещивающимися валами можно также *червячной передачей*, которая состоит из зубчатого червячного колеса 1) и винта-червяка 2 (рис. 3).

Ременную передачу применяют для передачи движения на значительные расстояния. Осуществляется передача при помощи гибкой бесконечной ленты – *ремня*, надетого на шкивы. В соответствии с поперечным сечением ремня передачи бывают *плоско-* и *клиноременные*. Недостатком этой передачи является невозможность работать с постоянным передаточным числом вследствие проскальзывания между ремнем и шкивами.

Цепная передача служит для той же цели, что и ременная, но при этом виде передачи соблюдается постоянно передаточного числа. На ведущий и ведомый валы насаживают зубчатые колеса – *звездочки*, которые связываются между собой бесконечной цепью.

Этот вид передачи применяется в некоторых станках, велосипедах, мотоциклах и др.

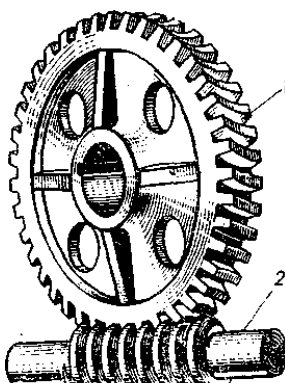


Рисунок 3 - Червячная передача: 1- колесо; 2 – винт - червяк

К современным машинам и их деталям предъявляются следующие требования:

- высокие эксплуатационные показатели (производительность, точность, КПД; простота и безопасность обслуживания; возможность автоматизации);

- высокая надежность (надежность – это свойство машины выполнять заданные функции в течение требуемого срока службы без поломок и внеплановых ремонтов);

- технологичность и экономичность. Технологичной является конструкция, которая может быть изготовлена с минимальными затратами труда и средств в условиях данного предприятия. Следовательно, здесь речь может идти о минимальной стоимости изготовления и эксплуатации;

- транспортабельность;

- эстетичность;

- эргономичность;

- экологичность.

Одной из главных составляющих надежности деталей машин является их работоспособность.

Работоспособность называется состояние изделия (сооружения, машины, прибора, узла, детали и т.д.), при котором оно способно выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями технической документации (стандартов, технических условий и другой нормативно-технической документации).

Требования, предъявляемые к деталям машин, без выполнения которых невозможна их нормальная работа, называют основными критериями работоспособности (работоспособного состояния).

Согласно вышеуказанному основными критериями работоспособного состояния и расчета деталей машин являются прочность, жесткость, износостойкость, теплостойкость и вибростойкость. Для некоторых деталей машин важной является стойкость против коррозии и старения.

Прочностью называется способность детали сопротивляться внешним воздействиям без поломок и поверхностных повреждений, а также без заметной пластической деформации.

При взаимодействии деталей машин деформацией может быть охвачен весь объем детали по сечению или локальный объем (местная деформация).

Износостойкость – способность материала оказывать сопротивление истиранию поверхности детали.

Теплостойкость – способность изделия работать в определенном диапазоне температур.

Вибростойкость – способность конструкции работать в заданном диапазоне режимов (прежде всего угловой скорости) без недопустимых колебаний.

Следует иметь в виду, что значение того или иного критерия для проектируемой детали машины обусловлено, прежде всего, условиями ее работы. Поэтому для конкретной детали один или несколько критериев являются главными.

2 УСЛОВИЯ РАБОТЫ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Детали машин в процессе эксплуатации могут быть жестко соединены между собой или иметь относительное перемещение, причем в последнем случае при наличии смазочного материала или без него, под нагрузкой или без нее. Окружающая среда может быть или нейтральной, или агрессивной, в запыленном или чистом помещении (при хорошей защите).

На детали в процессе эксплуатации машины могут действовать силы и моменты сил как распределенные, так и сосредоточенные. Кроме силового воздействия, детали могут испытывать температурное воздействие (например, детали червячного редуктора).

Рабочей называется нагрузка, воспринимаемая деталями машин в процессе эксплуатации машины. В зависимости от характера изменения во времени она может быть постоянной (например, нагрузка на неподвижную ось) или переменной (по направлению и модулю или только по модулю либо по направлению).

Примером переменной по направлению нагрузки является нагрузка на вращающуюся ось, на которую действует постоянная по модулю сила F , а точка ее приложения меняется.

В зависимости от характера действия различают **статическую и динамическую** нагрузку. К статической относится постоянная нагрузка, которая прикладывается к деталям спокойно, с постепенным увеличением ее значения так, чтобы нагружение не вызвало колебаний системы. К динамической относится нагрузка, приложение которой вызывает колебания системы, а при внезапном ее приложении имеют место удары.

Возможные причины отказов (выхода из строя) могут быть установлены на основе анализа данных эксплуатации деталей машин, аналогичных проектируемой, и соответствующих литературных источников.

Основными причинами выхода из строя деталей машин могут быть следующие:

а) появление пластических деформаций, как объемных так и поверхностных, приводящих к изменению формы и размеров деталей. Это наблюдается при перегрузках и вязком состоянии материала;

б) хрупкие разрушения в виде поломок по сечению или повреждений рабочей поверхности. Наблюдаются при перегрузках и хрупком состоянии материала;

в) повреждения усталостного характера в виде поломок или разрушения рабочей поверхности. Они наблюдаются при действии основной нагрузки, вызывающей переменные напряжения и обусловлены недостаточной цикли-

ческой прочностью (недостаточным сопротивлением усталости);

г) некоторые детали (например, валы) могут оказаться неработоспособными вследствие появления недопустимых упругих деформаций при растяжении, кручении и при изгибе, оказывающих существенное влияние на работоспособное состояние передач, подшипников и т.п. в таких случаях говорят о недостаточной жесткости детали;

д) многие детали машин выходят из строя вследствие износа трущихся поверхностей. Это обусловлено их недостаточной износостойкостью;

е) эксплуатация некоторых деталей машин (например, червячного редуктора) становятся невозможной из-за их недопустимого нагрева. В этих случаях говорят о недостаточной теплостойкости деталей машин;

ж) поломки деталей машин могут быть обусловлены их колебаниями, что свидетельствует о недостаточной их вибростойкости.

Под действием нагрузки детали машин или их элементы могут испытывать простую объемную деформацию следующих видов: растяжение-сжатие, сдвиг и смятие, кручение, изгиб и сложную деформацию – растяжение (сжатие) с кручением и изгибом (например, вал).

Местная деформация деталей машин имеет место в тех случаях, когда нагрузка деформирует ограниченный объем материала детали.

Различают два вида местной деформации: первый – обусловлен действием концентраторов; второй – связан с контактным взаимодействием.

Местная деформация, обусловленная действием концентраторов, влияет на объемную прочность, при этом в качестве концентраторов могут быть следующие типовые конструктивные элементы деталей машин:

- галтели – переходы от одной поверхности к другой радиусом различной величины;

- канавки для выхода инструмента;
- шпоночные пазы, отверстия, резьба, шероховатость поверхности и т.п.

В процессе эксплуатации деталей машин возможны следующие виды изнашивания: механическое (абразивное и усталостное), вследствие пластической деформации; молекулярно-механическое, вызванное поверхностно-активными присадками.

В результате износа изменяются размеры деталей, увеличиваются зазоры, понижается точность движения, уменьшается КПД, возникают дополнительные динамические нагрузки. Большой износ может привести к разрушению детали. Износ детали снижается с повышением твердости и понижением шероховатости трущихся поверхностей и, в особенности, при условии обеспечения жидкостного трения.

Тепловыделение, связанное с рабочим процессом (например, в двигателях внутреннего сгорания) или с преодолением сил трения в кинематических парах (подшипниках скольжения, червячном зацеплении и т.п.), обуславливает изменение условий работы сопряженных поверхностей вследствие снижения защитной способности масляного слоя, что вызывает повышенный износ или заедание. Кроме того, в результате нагрева могут возникнуть и другие, вредные для работы деталей машин, явления. Так, при нагреве стальных деталей до температуры 300-400°C, а деталей из цветных сплавов и пластмасс - до 100-150°C значительно снижаются их механические свойства и возникает явление ползучести. При чрезмерном нагреве изменяются зазоры в кинематических парах, появляются дополнительные нагрузки.

Выбор материала является ответственным этапом проектирования. При выборе материала и назначения упрочняющей обработки исходят из технико-экономических соображений и обязательно учитывают условия работы дета-

ли в машине. При этом необходимо принимать во внимание следующее:

- соответствие свойств материала главному критерию работоспособности детали;
- весовые и габаритные требования к детали и машине в целом;
- требования, связанные с назначением детали и условиями ее эксплуатации (например, жаропрочность, коррозионная стойкость);
- соответствие технологических свойств материала форме и намеченному способу обработки детали с целью выбора наиболее экономичного способа изготовления детали при известном масштабе ее производства;
- стоимость и дефицитность материала;
- стойкость к газовой, электрохимической и контактной фреттинг-коррозии;
- требования эстетики.

При проектировании детали можно выбрать различные материалы для ее изготовления. Окончательное решение принимают, исходя из экономических соображений.

В соответствии с вышеизложенным можно дать следующие методические рекомендации по выбору материала деталей машин.

Детали, размеры которых определяются прочностью (зубчатые колеса, валы и др.), следует выполнять из материалов с высокими прочностными характеристиками, например, из улучшаемой или закаливаемой стали и чугуна повышенной прочности.

Детали, испытывающие большие упругие перемещения (торсионные валы, пружины), должны выполняться из термообработанных сталей с высоким значением предела упругости и прочности.

Детали, подверженные контактному воздействию и износу в условиях качения или качения со скольжением (зуб-

чатые колеса, подшипники качения), следует изготавливать из сталей, закаливаемых до высокой твердости.

В узлах скольжения, работоспособность которых определяется износостойкостью деталей, одна из них должна иметь более высокую твердость рабочей поверхности, а другую следует выполнять из антифрикционного материала (в антифрикционных узлах - подшипниках и направляющих скольжения) или из фрикционного материала (во фрикционных узлах - фрикционных передачах, муфтах и т. п.). При высокой точности изготовления деталей и обеспечении их самоустановки, при которой исключается необходимость какой-либо приработки, а также при удовлетворении условий создания жидкостного трения обе детали могут иметь высокую поверхностную твердость.

Согласно вышеизложенному становится понятной современная тенденция повышения прочности деталей за счет применения технологий поверхностных упрочнений: химико-термическая обработка, лазерная обработка, наплавка износостойких сплавов и покрытий с использованием концентрированных источников энергии (КИЭ).

Известно, что допускаемые напряжения на материал детали зависят от следующих факторов:

- характера действующей нагрузки (постоянная или переменная);
- механических свойств материала и его структурного состояния;
- конфигурации детали и ее размеров;
- наличия технологии упрочняющей обработки и состояния поверхности;
- режима нагружения;
- гарантийного срока службы;
- способа получения заготовки;
- степени ответственности.

3 ЧЕРВЯЧНАЯ ПЕРЕДАЧА

3.1 Общая характеристика, условия работы и область применения

Червячные передачи относятся к числу зубчато-винтовых, имеющих характерные черты зубчатых и винтовых передач. В отличие от винтовых зубчатых передач с перекрещивающимися осями, у которых начальный контакт происходит в точке, в червячных передачах имеет место линейный контакт. В осевом сечении зубья колеса имеют дуговую форму. Это обеспечивает облегчение тела червяка и увеличение длины контактных линий.

Червячная передача (рис. 3.1) состоит из червяка 1, т. е. винта с трапецеидальной или близкой к ней по форме резьбой, и червячного колеса с зубьями особой формы (2), получаемой в результате взаимного огибания с витками червяка.

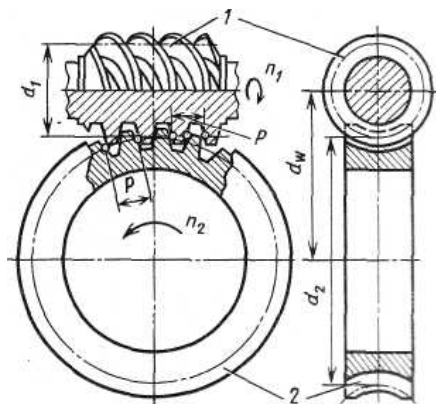


Рисунок 3.1 - Схема червячной передачи

Достоинства червячных передач:

- 1) возможность получения большого передаточного отношения;
- 2) плавность и бесшумность работы, возможность точных делительных перемещений;
- 3) возможность самоторможения.

Основные недостатки червячной передачи:

- 1) необходимость применения для червячного колеса дорогих и дефицитных антифрикционных сплавов;
- 2) пониженный КПД.

Механизмы с использованием червячных передач получили широкое применение в машиностроении и других областях промышленности. Червячные передачи работают в различных условиях.

В первую очередь в условиях с нагрузками, близкими к пределу контактной выносливости материала передачи, а также в режимах кратковременных перегрузок.

Кроме того, при больших скоростях скольжения и длительных по времени перегрузках в условиях повышенного трения происходит выделение большого количества тепла, в результате чего возможен нагрев элементов червячной передачи до высоких температур.

Но следует отметить, что значительная часть червячных передач работает в условиях, когда они не испытывают высоких нагрузок и перегрузок, а также не подвержены действию повышенных температур. Характерными особенностями работы червячных передач по сравнению с зубчатыми передачами являются большие скорости скольжения и неблагоприятное направление скольжения относительно линии контакта.

Червячные передачи применяют при необходимости снижения скорости и передачи движения между перекрещивающимися (в большинстве случаев взаимно перпенди-

кулярными) валами в подъёмно-транспортных машинах, станках, автомобилях и других машинах.

Вследствие относительно низкого КПД червячные передачи применяют для небольших и средних мощностей. Передаточные отношения обычно принимают равными от 8 до 80.

Как указывалось, в червячном зацеплении имеется зона с неблагоприятными условиями скольжения, которая может искажаться в связи с деформациями тела червяка. Выполнение обоих тел червячной пары из твёрдых материалов не даёт положительных результатов и одно тело (обычно колесо) необходимо выполнять из антифрикционного, относительно мягкого материала.

Материалы червячной пары в соответствии с видами разрушения и повреждения зубьев должны обладать износостойкостью, пониженной склонностью к заеданию, хорошей прирабатываемостью и повышенной теплопроводностью.

Для изготовления червяков применяют различные сорта углеродистой и легированной стали (табл.3.1). Выбор той или иной марки стали зависит от назначаемой термической обработки червяка и его габаритных размеров.

Таблица – 3.1. Материалы, рекомендуемые для червяков

Материал	Твёрдость рабочих поверхностей витков
Стали улучшаемые 40Х, 45Х, 40ХН, 38ХГН	HRC 30 – 38
Стали поверхностно-закаляемые 45, 40Х, 45Х, 40ХН	HRC 50 – 55
Стали цементируемые 15Х, 20Х, 12ХН3А, 20ХФ	HRC 58 – 63
Стали азотируемые 38Х2МЮА, 38Х2Ю	HRC 58 – 63
Чугуны СЧ 15, СЧ 20	HB 163 – 241

Червяки можно изготавливать как относительно низкой твёрдости, из стали, подвергаемой улучшению, так и с высокой поверхностной твёрдостью витков, закалённых по поверхности токами высокой частоты (ТВЧ) или цементированных и закалённых. Во всех случаях рекомендуется добиваться возможно большей чистоты поверхности рабочих поверхностей витков червяка. Для этого витки червяков, подвергнутых поверхностной закалке или цементации, шлифуются и полируются, а витки червяков из улучшенной стали – полируются.

Червяки с гладкими и высокотвёрдыми рабочими поверхностями витков обеспечивают наибольшую стойкость зубьев червячных колёс против заедания и выкрашивания. При этом достигается наименьший износ зубьев червячного колеса, снижается опасность «намазывания» бронзы на червяк в результате «опиливания» её шероховатыми поверхностями твёрдого червяка.

Термоулучшаемые червяки применяют вместо закалённых из-за ограниченных технологических возможностей (отсутствия оборудования для шлифования червяков) или ввиду необходимости взаимной приработки червяка и колеса. Кроме того, улучшенные и нормализованные червяки целесообразно применять во вспомогательных тихоходных и малонагруженных передачах.

Для передач с чугунными колёсами больших диаметров можно применять бронзовые червяки.

Червячные колёса следует изготавливать из материалов, обладающих хорошими противозадирными и антифрикционными свойствами. Склонность медных сплавов к заеданию особенно резко понижается с увеличением процента входящего в их состав олова.

Хорошими антизадирными присадками для медных сплавов являются также свинец, никель и сурьма. Наиболее низкими антизадирными свойствами обладают чугуны.

Материалы для червячных колес, работающих в паре со стальным червяком, можно разбить на четыре группы, в зависимости от склонности этих материалов к заеданию.

Группа 1. Высокооловянистые (6 – 10% Sn) бронзы, содержащие фосфор, свинец, сурьму и никель, а также сурмяно-никелевая бронза (7 – 8% Sb, 1,5 – 2,5% Ni). Такие бронзы отличаются хорошими антизадирными свойствами, но относительно низкой прочностью, а следовательно, и низкими допускаемыми контактными напряжениями и напряжениями изгиба. Особенно малую прочность имеют бронзы, содержащие свинец. Применение высокооловянистых бронз вследствие дефицитности и высокой стоимости олова ограничивается наиболее быстроходными ответственными передачами.

Характерной особенностью материалов первой группы является мягкая форма заедания даже при работе передачи со значительными перегрузками. Заедание протекает в виде повышенного износа, а не в виде задира. В этом случае допустимы значительные по величине и длительные по времени перегрузки.

Группа 2. Бронзы, соответствующие по составу бронзам первой группы, но с меньшим содержанием олова (3 – 6% Sn), поэтому их антизадирные свойства хуже, чем бронз первой группы, особенно при высоких скоростях скольжения.

Группа 3. Безоловянистые бронзы и латуни широко используются как заменители оловянистой бронзы. Известно, что их применяют при скоростях скольжения, редко превышающих 10 м/сек. Лучшими антизадирными свойствами обладают хорошо прирабатывающиеся (в паре с червяком) бронзы и латуни с невысокой прочностью.

Червячные колёса из более прочных сплавов прирабатываются значительно хуже; концентрированная по длине зубьев нагрузка выравнивается длительно, следствием чего

при работе с полной нагрузкой без продолжительной приработки возможно заедание.

Группа 4. В качестве материала для червячных колёс рекомендуются относительно мягкие серые чугуны: СЧ20, СЧ 25.

У этой группы материалов предельная допускаемая скорость скольжения при нормальной (немодернизованной) конструкции венца червячного колеса не превышает 2 м/сек и лишь в исключительных случаях – 3 м/сек. Из твёрдых чугунов червячные колёса изготавливать нежелательно. Твёрдые чугуны плохо прирабатываются, вследствие чего возрастает вероятность задира в местах концентрации нагрузки. Даже для мягких серых чугунов контактные напряжения, допускаемые из условия отсутствия заедания, без тщательной приработки должны быть снижены, по крайней мере, на 30%. В случае применения для червячных колёс легированного чугуна несущая способность червячной передачи повышается.

Попытки применить тонкослойное покрытие зубьев червячных колёс для повышения их противозадирной стойкости (например, сульфидирование), равно как и искусственное смещение пятна контакта в выходную зону, дают лишь временный эффект: через несколько десятков часов червячные передачи прирабатываются, покрытие стирается, а пятно контакта распространяется на всю рабочую поверхность зуба колеса, в том числе и на входную зону, опасную в отношении задира.

3.2 Возможные причины отказа

Причинами выхода червячной передачи из строя могут быть следующие:

1 **Поломка** зубьев червячного колеса или, в редких случаях, поломка витков червяка (рис. 3.2). Данный вид повреждения может произойти в результате образования и роста усталостной трещины, возникшей при работе передачи с нагрузками, превышающими предел выносливости материала. Известны также случаи, когда поломка происходила в момент недопустимо большой кратковременной перегрузки передачи (например, при пуске).



Рисунок 3.2 - Червяк с поломанными витками

2 **Усталостное выкрашивание** рабочих поверхностей зубьев червячного колеса (рис. 3.3), появление **раковин** и **трещин** на поверхности витков цементованных, а также закалённых червяков. Основной причиной выкрашивания являются контактные напряжения, превышающие предел контактной выносливости металла для данного числа циклов напряжений. Наблюдается оно преимущественно у зубьев червячных колёс из сплавов с относительно низкой контактной выносливостью и с повышенными антизадириными свойствами.

Причиной появления поверхностных трещин на боковых сторонах закалённых, а также цементованных и зака-

лѐнных червяков могут быть локализованный контакт (концентрация нагрузки), местные вспышки температуры в поверхностных слоях материала из-за недостаточной смазки и т. п. Трещины могут появиться как следствие технологических дефектов, например, из-за малой прочности закалѐнного слоя, «прижогов» при шлифовании и др.

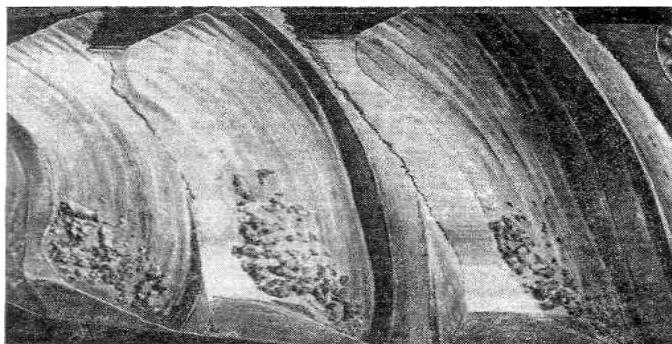


Рисунок 3.3 - Выкрашивание рабочих поверхностей зубьев червячного колеса

Образование трещин, сопровождаемое отслаиванием материала рабочих поверхностей витков цементованных червяков (рис. 3.4), является результатом высоких касательных напряжений, зона максимума которых оказывается ниже науглероженного и закалѐнного слоя.

3 **Износ** зубьев червячного колеса в отдельных случаях происходит из-за недостаточной чистоты масла (абразивный износ) или повышенной шероховатости поверхности витков значительно более твѐрдого червяка. В подавляющем же большинстве случаев червячные передачи выходят из строя по причине износа зубьев червячного колеса, обусловленного **заеданием** рабочих поверхностей червячной пары. Следует отметить, что изнашиваются, хотя и в меньшей степени, витки червяка (рис. 3.5). Заедание может протекать в виде **натира**, т. е. в мягкой форме, вызывая

постепенный износ зубьев, сопровождающийся «намазыванием» бронзы на червяк. При этой форме заедания червячная передача может ещё работать некоторое время, обусловленное интенсивностью износа зубьев.

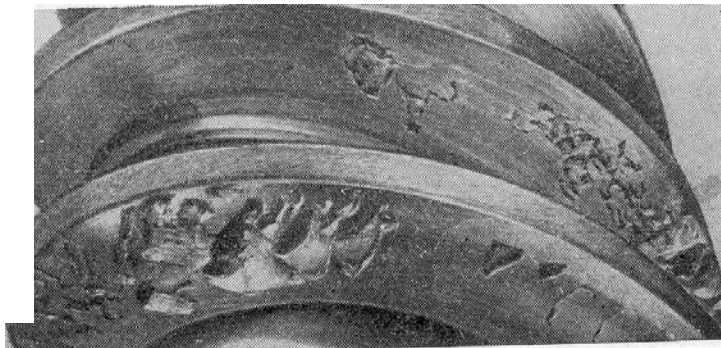


Рисунок 3.4 - Отслаивание материала рабочих поверхностей витков червяка

Если натир возникает с первого момента работы передачи, то не исключено, что он потом прекратится вследствие приработки и распространения пятна контакта на всю боковую поверхность зуба червячного колеса.

Значительно более тяжёлой формой заедания является **задир** рабочих поверхностей червячной пары. При задире резко повышается коэффициент трения в зацеплении, и если не снизить нагрузку, то за короткий промежуток времени происходит полный износ зубьев.

Для возникновения заедания, помимо больших контактных напряжений на вершинах гребешков неровностей, необходимо, чтобы хотя бы на части поверхности контакта имело место граничное трение.

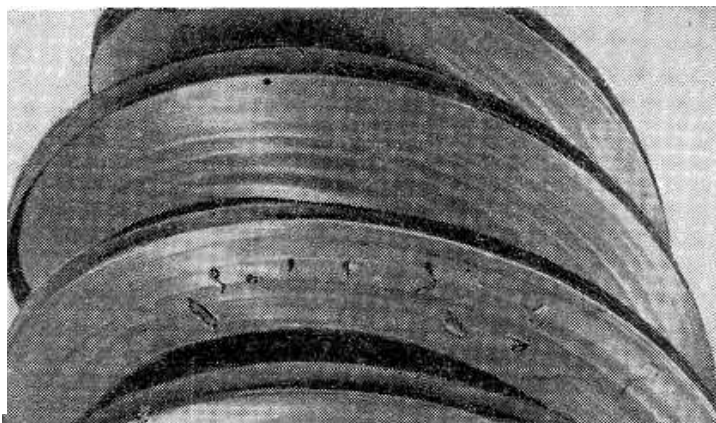


Рисунок 3.5 - Изношенные витки цементованного и закаленного червяка со следами усталостного выкрашивания

3.3 Методы повышения работоспособности

Большинство червячных передач работают в условиях высоких скоростей скольжения и неблагоприятных направлений скольжения относительно линии контакта, испытывают повышенные нагрузки и многократные перегрузки. В связи с этим возникает явление отказа и выхода из строя червячных передач. Для уменьшения количества данных явлений разрабатываются методы повышения работоспособности червячных передач (конструкционные, эксплуатационные и технологические).

Червячные передачи работают с большим тепловыделением. Между тем нагрев масла до температуры, превышающей предельную $\approx 95^{\circ}\text{C}$, приводит к потере им защитной способности и к опасности заедания в передаче. Поэтому для восстановления теплового баланса необходимо применить искусственное (воздушное или водяное) охлаждение, благодаря которому повышается термическая мощность, передаваемая редукторами.

Искусственный обдув осуществляется вентилятором, установленным на валу червяка. Воздушное охлаждение значительно проще и дешевле водяного, поэтому оно получило наибольшее распространение. Оно более эффективно при расположении червяка под червячным колесом, так как в этом случае воздушный поток охлаждает масляную ванну. При искусственном обдуве коэффициент теплоотдачи обдуваемых стенок достигает $20 - 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ и выше.

Водяное охлаждение применяют при необходимости отвода большого количества тепла. Коэффициент теплоотдачи от поверхности труб с охлаждающей жидкостью равен $100 - 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

Кроме того, с заеданием и прогрессирующим задиром в червячных передачах борются путём применения в качестве материала для червячного колеса относительно дорогих высокооловянистых бронз, с хорошими противозадирными свойствами, но сравнительно низкой контактной прочностью.

В случаях применения для червячных колёс различных заменителей оловянистых бронз опасность заедания и прогрессирующего задирания обычно возрастает.

Повышение нагрузочной способности червячных передач может быть достигнуто модернизацией конструкции формы зубьев, позволяющей перераспределять действие нагрузок и снижать склонность к заеданию.

Экспериментальные данные показывают, что несущая способность перемещающихся одна по другой смазанных поверхностей может быть значительно повышена, если обеспечить между ними хотя бы на начальной части контакта клиновидный зазор в направлении скорости. Для цилиндрических поверхностей с линейным начальным касанием это соответствует условию, что скорость перпендикулярна линии контакта или имеет значительную слагаю-

щую, перпендикулярную к этой линии. При этом трение металлов без смазочного материала заменяется жидкостным; масло, затягиваемое в клиновидный зазор, воспринимает частично или полностью действующую нагрузку. Так же эффективным средством повышения несущей способности червячных передач с чугунными колёсами является хромирование витков червяков (толщина покрытия 0,1-0,15 мм).

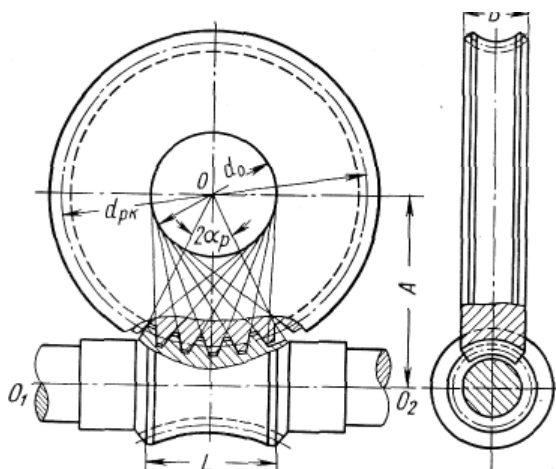


Рисунок 3.6 - Червячная глобоидная передача

Несущую способность червячных передач можно существенно повысить, если выполнить червяк и колесо глобоидными (рис. 3.6). При этом увеличиваются числа зубьев в зацеплении, приведенные радиусы кривизны и контактные линии в зацеплении располагаются под большим углом к направлению скорости скольжения, что улучшает условия для образования масляных клиньев в зацеплении. Несущая способность глобоидных передач при условии точного изготовления и надлежащего охлаждения около полутора раз больше, чем передач с цилиндрическими червяками с линейчатыми рабочими поверхностями.

Глобоидные передачи вследствие своих малых габаритов и, следовательно, малой поверхности теплоотдачи оказываются сильно напряжёнными в тепловом отношении, поэтому их применяют преимущественно в повторно кратковременном режиме и с искусственным охлаждением. Применение глобоидных передач более эффективно для больших моментов, чем для малых.

4 ВАЛЫ

4.1 Общая характеристика, условия работы и область применения

Валы (рис. 4.1) применяются для передачи движения вращения без изменения угловой скорости и притом вдоль оси вала или под небольшим углом к этой оси (до 20°). Когда же требуется изменить угловую скорость или передать вращение под большим углом, прибегают к колесным передачам с гибкими приводами или без них.

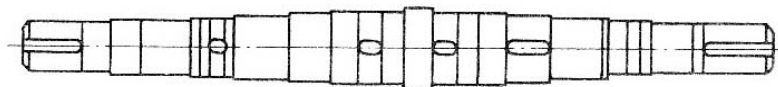


Рисунок 4.1 - Вал паровой турбины

Различают горизонтальные (лежачие), вертикальные (стоячие) и наклонные валы.

В общем машиностроении применяют различные валы, начиная от мелких и кончая крупными, диаметром более 100 см и весом до нескольких тонн. Используют цельные и пустотелые, гладкие и ступенчатые валы.

В машинах транспортного и сельскохозяйственного машиностроения валы и оси по их назначению подразделяют на несколько категорий: валы для двигателей; про-

межуточные валы, в частности, карданные; трансмиссионные валы; кулачковые; эксцентрикковые и др.

По форме геометрической оси различают валы прямые (гладкие и ступенчатые), коленчатые и кривошипные. Встречаются валы, изготавливаемые из труб.

Валы воспринимают силы со стороны передач и, следовательно, они испытывают сложную деформацию: изгиб, кручение, растяжение - сжатие. В процессе работы возможны поломки, вследствие действия статических и усталостных (в том числе обусловленных колебаниями) нагрузок, а также деформации недопустимых значений. В связи с этим основными критериями работоспособности являются прочность, жесткость и виброустойчивость. У валов, работающих в паре с подшипниками скольжения, важно обеспечить износостойкость.

Практикой установлено, что разрушение валов и осей быстроходных машин в большинстве случаев носит усталостный характер, поэтому основной расчет – расчет на сопротивление усталости. Кроме того, их рассчитывают на жесткость и вибростойкость.

Предел выносливости вала сильно зависит от его конфигурации, от наличия концентрации напряжений и от величины и распределения контактного давления в случае, если для закрепления деталей на валу применены посадки с натягом.

Для оценки прочности необходимо знать действительные распределения напряжений в сечениях вала от внешних нагрузок, которые передаются на валы от сопряженных деталей и определяются путем расчета.

Ввиду того, что усталостная прочность сильно понижается при резком возрастании контактного давления, целесообразно применять детали такой формы, при которой удельное давление нарастает постепенно.

Выбор материала и термической обработки валов оп-

ределяется критериями их работоспособности, в том числе критериями работоспособности цапф с опорами. Значимость последних критериев в случае опор скольжения может быть определяющей.

Основными материалами для валов и осей служат углеродистые и легированные стали благодаря высоким механическим характеристикам, способности к упрочнению и легкости получения цилиндрических заготовок прокаткой (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Механические характеристики основных материалов валов

Марка стали	Диаметр заготовки, мм (не более)	Твердость НВ, не менее	σ_b , МПа	σ_T , МПа	σ_{-1} , МПа
Ст 5	Не огранич.	190	520	280	220
Сталь 45	Не огранич.	200			
	120	240	560	280	250
	80	270	800	550	350
40X	Не огранич.	200			
	200	240	900	650	380
	120	270	730	500	320
40XH	Не огранич.	240	800	650	360
	200	270	920	750	420
20X	120	197	650	400	300
12XH3A	120	260	950	700	420
12X2H4A	120	300	1100	850	500
18XГТ	60	330	1150	950	520
30XГТ	Не огранич.	270	950	750	450
	120	320	1150	950	520
	60	415	1500	1200	650

Для большинства валов применяют термически обрабатываемые среднеуглеродистые и легированные стали 45, 40X. Для высоконапряженных валов ответственных машин применяют легированные стали: 40XH, 40XH2MA, 30XГТ,

30ХГСА и др. Валы из этих сталей обычно подвергают улучшению, закалке с высоким отпускком или поверхностной закалке с нагревом ТВЧ и низким отпускком (шлицевые валы) или обработке высококонцентрированным источником энергии (ВИЭ).

Быстроходные валы, вращающиеся в подшипниках скольжения, требуют весьма высокой твердости цапф; их изготавливают из цементируемых сталей 20Х, 12ХНЗА, 18ХГТ или азотируемых сталей типа 38Х2МЮА. Высокую износостойкость имеют хромированные валы. По опыту автомобилестроения хромирование шеек коленчатых валов увеличивает ресурс до перешлифовки в 3-5 раз.

Также для изготовления валов применяют жаропрочные и нержавеющие стали и сплавы, титановые сплавы, пластмассы и другие материалы.

Для валов, размеры которых определяются условиями жесткости, прочные, термически обработанные стали целесообразно применять только тогда, когда это определяется требованиями долговечности цапф, шлицев и других изнашиваемых поверхностей. Жесткость конструкции определяется склонностью материала к хрупкому разрушению или деформации от действующих и внешних нагрузок. Для оценки напряженного состояния вводится коэффициент жесткости

$$\alpha = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\max}} ;$$

где τ_{\max} – наибольшее касательное напряжение, определяющее возможность пластической деформации;

σ_{\max} – наибольшее нормальное напряжение, определяющее величину упругой деформации и опасность хрупкого разрушения путем отрыва.

Применение сварных валов мощных гидротурбин приводит к экономии до 40 % металла.

Для изготовления фасонных валов (коленчатых, с большими фланцами и отверстиями) и тяжелых валов на-

ряду со сталью применяют высокопрочные чугуны (с шаровидным графитом) и модифицированные чугуны. Меньшая прочность чугунных валов в значительной степени компенсируется более совершенными формами валов, меньшей чувствительностью к смещению опор в многоопорных валах, особенно коленчатых, и меньшей динамической нагрузкой ввиду повышенной демпфирующей способности.

В качестве заготовок для стальных валов диаметром до 150 мм обычно используют круглый прокат, для валов большего диаметра и фасонных валов - поковки.

Валы подвергают токарной обработке и последующему шлифованию посадочных поверхностей.

В настоящее время для повышения несущей способности валов применяют поверхностное пластическое деформирование (ППД) или поверхностную термомеханическую обработку.

4.2 Возможные причины отказа

Из-за ошибок при расчете, нарушений технологии изготовления или условий эксплуатации могут возникнуть биение вала, колебания и вибрации.

Валы могут оказаться неработоспособными в результате появления **недопустимых упругих деформаций** при растяжении, кручении или при изгибе, оказывающих существенное влияние на работоспособное состояние передач, подшипников и т.п. В таких случаях говорят о недостаточной жесткости детали. Чрезмерное изгибание и крутильные деформации приводят к нарушению условий сопряжения в соединениях с деталями и относительного положения их контактирующих элементов. На несущих участках в зависимости от типа соединения могут возникнуть смятия рабочих поверхностей шпоночных пазов, зубьев, износ зубьев, фрикционная коррозия, концентрация давле-

ний, чем создаются предпосылки для возникновения очага усталостного разрушения.

Поломки валов в большинстве случаев носят усталостный характер и происходят в зоне концентрации напряжений. Причинами, вызывающих их, могут быть: неудачный выбор конструктивной формы детали и неправильная оценка влияния концентратора напряжений, нарушение норм технологической эксплуатации (неправильная регулировка затяжки подшипников, уменьшение необходимых зазоров).

Причиной выхода из строя отдельных быстроходных валов могут быть колебания. В соответствии с этим такие валы дополнительно рассчитываются на колебания (вибростойкость).

Для большинства валов колебания вызываются силами от неуравновешенно установленных на них деталей, если частота действия этих сил равна частоте вращения вала. При совпадении или кратности частоты возмущенных сил и частоты собственных колебаний вала наступает резонанс, амплитуда колебаний резко возрастает и может достигнуть такого значения, при котором вал разрушится.

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

Износ – результат изнашивания, определенный в установленных единицах.

К недопустимым процессам повреждаемости поверхностей трения, возможность возникновения которых, как показывает практика, достаточно велика, относятся следующие.

Схватывание I рода (холодный задир) – процесс недопустимой повреждаемости поверхностей трения в результате возникновения локальных металлических связей, их деформации и разрушения с отделением частиц металла

или налипанием на поверхности контакта. Возникновение металлических связей происходит при интенсивной деформации, разрушении защитных пленок окислов и контактировании ювенильных участков поверхности (рис. 4.1 а; 4.2). Схватывание I рода возникает при трении скольжения с малыми скоростями относительного перемещения и удельными нагрузками, превышающими предел текучести на участках фактического контакта при отсутствии разделяющего слоя смазки и защитной пленки окислов. Схватывание I рода - один из наиболее опасных и резко выраженных видов повреждения деталей машин.

Схватывание II рода (горячий задир) – процесс недопустимой повреждаемости поверхностей трения в результате возникновения местных металлических связей, их деформации и разрушения, выражающийся в образовании трещин, намазывании, переносе металла и отделении частиц с поверхностей трения. Возникновение металлических связей при этом обусловлено недопустимым развитием температуры на поверхностях трения; размягчением, деформацией поверхностных слоев; контактированием ювенильных поверхностей (рис. 4.1 б). Схватывание II рода возникает при трении скольжения с большими скоростями относительного перемещения и значительными удельными нагрузками, обуславливающими интенсивное повышение температуры и состояние термической пластичности в поверхностных слоях трущихся металлов. Это опасное и достаточно распространенное в машинах явление повреждаемости.

Фреттинг-процесс – разрушение поверхностей трения деталей машин - возникает при трении скольжения с очень малыми возвратно-поступательными перемещениями и при динамическом приложении нагрузки. Фреттинг-процесс - весьма опасный вид повреждаемости, достаточно широко распространенный в деталях машин (рис. 4.1 в).

Абразивное изнашивание и повреждаемость – про-

цессы разрушения поверхности деталей машин, обусловленного наличием абразивной среды в зоне трения. Существуют две формы проявления абразивных процессов, отличающиеся характером взаимодействия частиц с поверхностью металла; с преобладанием процессов окисления (пластическое деформирование поверхностных объемов, их окисление и последующее разрушение образующихся пленок - разновидность окислительного изнашивания (рис. 4.1 г) и с преобладанием механического разрушения металла (внедрение абразивных частиц и разрушение поверхностных объемов металла со снятием микростружки или без отделения металла – рис. 4.1 д).

Абразивное изнашивание может возникать в самом широком диапазоне внешних механических воздействий. Проявление окислительной или механической формы этого вида разрушения зависит от соотношения механических свойств абразивных частиц и поверхностных слоев изнашиваемого металла. Абразивные процессы часто сопутствуют другим видам изнашивания и повреждаемости деталей машин.

Контактная усталость (питтинг). Усталостные повреждения возникают в деталях машин при трении качения (подшипники качения, зубчатые зацепления) и являются результатом интенсивного разрушения поверхностных слоев металла, находящихся в особых условиях напряженного состояния. Разрушение поверхностей при усталостных повреждениях характеризуется возникновением микротрещин единичных и групповых впадин (рис. 4.1 е).

При нормальном трении, в отличие от равновесного состояния, в сечении поверхностных слоев можно выделить три зоны (рис. 4.3), отличающихся по своему структурному состоянию: контактную зону 1 (зона вторичных структур) толщиной порядка тысяч нанометров; подповерхностную зону 2 толщиной до нескольких микрометров и зону исходной структуры 3. Зона 1 вторичных структур

имеет специфическое измельченное ориентированное строение. В зоне 2 наблюдаются обычные дислокационные структуры, типичные для сильно деформированных металлов. В зоне 3 фиксируется структура, не подвергшаяся изменениям.

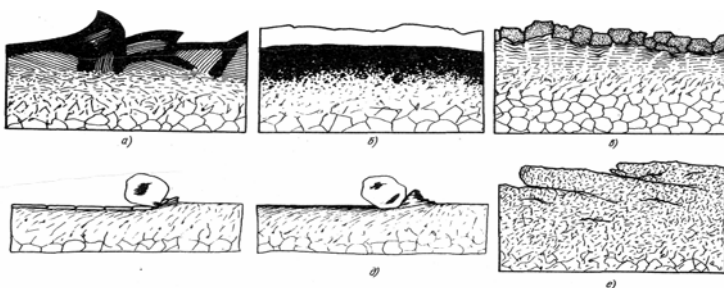


Рисунок 4.1 - Модели строения поверхностных слоев
 а - схватывание I рода; б - схватывание II рода;
 в - фреттинг-процесс; г - окислительное изнашивание;
 д - механическое разрушение; е – контактная усталость

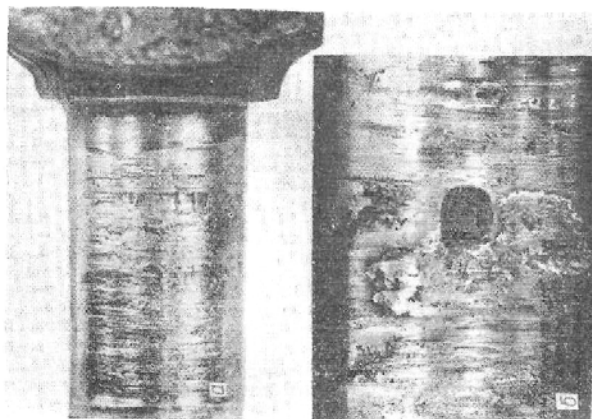


Рисунок 4.2 – Внешний вид детали машин, работающих при схватывании 1-го рода

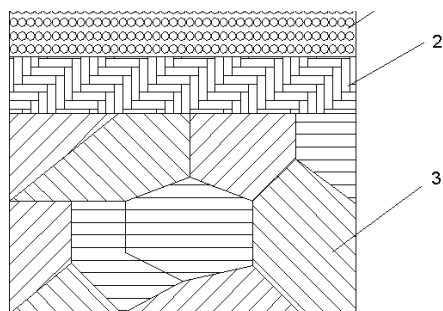


Рисунок 4.3 - Схема строения поверхностных слоев при нормальном механо-химическом износе: 1 – контактная зона, 2 – подповерхностная зона, 3 – исходная (базовая) структура

4.3 Методы повышения работоспособности

Конструктивные средства повышения выносливости показаны на рис. 4.4. Наиболее эффективное утолщение вала на длине ступицы. Весьма эффективное также поверхностное упрочнение.

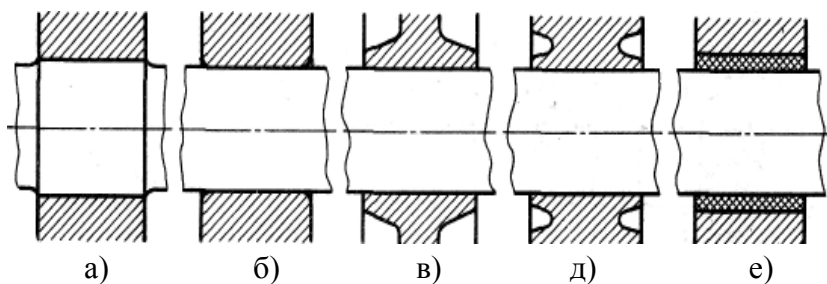


Рисунок 4.4 - Конструктивные средства повышения сопротивления валов усталости в местах посадок (а – утолщение подступичной части; б - закругление кромок ступицы; в - утончение ступицы; д - разгрузочные канавки; е - втулки или заливки в ступице из материала с низким модулем упругости)

Упрочнением подступичных частей поверхностным наклепом (обкаткой роликами или шариками) можно повысить предел выносливости валов с концентрацией напряжений на 80-100 %, причем этот эффект распространяется на валы диаметром 500-600 мм и более. Такое упрочнение получило в настоящее время широкое распространение.

Прочность валов в местах шпоночных, шлицевых и других разъемных соединений со ступицей может быть повышена применением: эвольвентных шлицевых соединений; шлицевых соединений с внутренним диаметром, равным диаметру вала на соседних участках, или с плавным выходом шлицев на поверхность, обеспечивающим минимум концентрации напряжений изгиба; шпоночных канавок, изготавливаемых дисковой фрезой и имеющих плавный выход на поверхность; бесшпоночных соединений.

Переходные участки валов между двумя ступенями разных диаметров выполняют следующих типов (рис. 4.5).

С канавкой для выхода шлифовальных кругов, которые обычно выполняют на валах диаметром 10...50 мм шириной 3 мм и глубиной 0,25 мм, а на валах диаметром 50- 100 мм - шириной 5 мм и глубиной 0,5 мм, **должны иметь максимально возможные радиусы закруглений. Канавки существенно повышают стойкость шлифовальных кругов при обработке. Однако они вызывают значительную концентрацию напряжений и понижают прочность валов при переменных напряжениях.**

Канавки выполняют в валах, диаметры которых определяются условиями жесткости (в частности, валах коробок передач), и на концевых участках валов, на которых изгибающие моменты невелики. Канавки также нужны на концах участков с резьбой для выхода резьбонарезного инструмента.

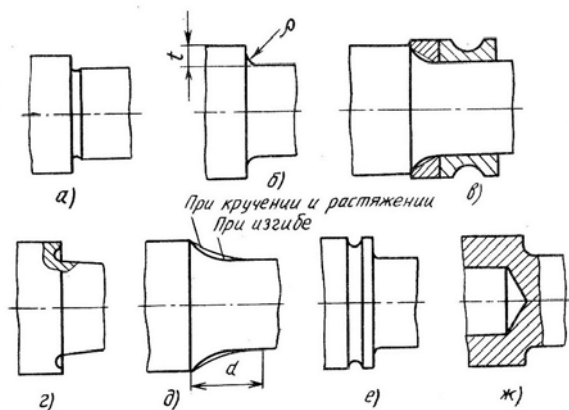


Рисунок 4.5 – Переходные поверхности валов: а - с канавкой для выхода шлифовального круга; б - постоянного радиуса; в - под промежуточное кольцо; г - эллиптическая с поднутрением; д - оптимальной формы при изгибе (внутренняя кривая) и при кручении и растяжении (наружная кривая); е - с разгрузочной канавкой; ж - с отверстием в ступени большого диаметра

С переходной поверхностью - галтелью постоянного радиуса – радиус r выбирают меньше радиуса закругления или радиального размера фаски насаживаемых деталей.

Желательно, чтобы радиус закругления в сильно-напряженных валах был больше или равен $0,1d$. Однако это условие далеко не всегда можно выдержать, так как при этом увеличиваются осевые размеры. При высокой напряженности вала возможно осевое базирование деталей по самой переходной поверхности, но это исполнение весьма трудно в технологическом отношении. **Когда радиус галтели сильно ограничивается радиусом закругления кромок насаживаемых деталей, ставят проставочные кольца.**

С переходной поверхностью – галтелью специальной формы – опасной зоной обычно является переход галтели в ступень меньшего диаметра; поэтому в заданных габаритах целесообразно делать галтель переменного радиуса

кривизны с увеличением радиуса в зоне перехода к ступени меньшего диаметра. Применяют галтели эллиптической формы и чаще галтели, очерчиваемые двумя радиусами кривизны. Переменность радиуса кривизны галтели повышает несущую способность вала на 10 %.

Подбором галтели оптимальной фирмы на длине 0,75-1 диаметра вала можно практически избавиться от концентрации напряжений. Однако использовать такие формы можно в редких случаях, например, в торсионных валах (т. е. валах, служащих пружиной, работающей на кручение), на свободных участках сильнонапряженных валов и т. д.

Повышение прочности валов в переходных сечениях достигается также удалением малонапряженного материала: выполнением разгрузочных канавок и высверливанием отверстий в ступенях большого диаметра. Эти мероприятия обеспечивают более равномерное распределение напряжений и снижают концентрацию напряжений.

Пластическим упрочнением галтели (обкаткой роликами, а при больших диаметрах валов – чеканкой) можно повысить несущую способность валов в 1,5-2 раза.

5 ЗУБЧАТАЯ ПЕРЕДАЧА

5.1 Общая характеристика, условия работы и область применения

Зубчатые передачи выполняются в виде составных частей машин, либо в виде отдельных агрегатов. Они выполняют функции передачи энергии с преобразованием угловых скоростей и осуществляются с помощью зубчатых колес, которые непрерывно и знакопеременно зацепляются друг с другом своими зубьями (рис. 5.1).

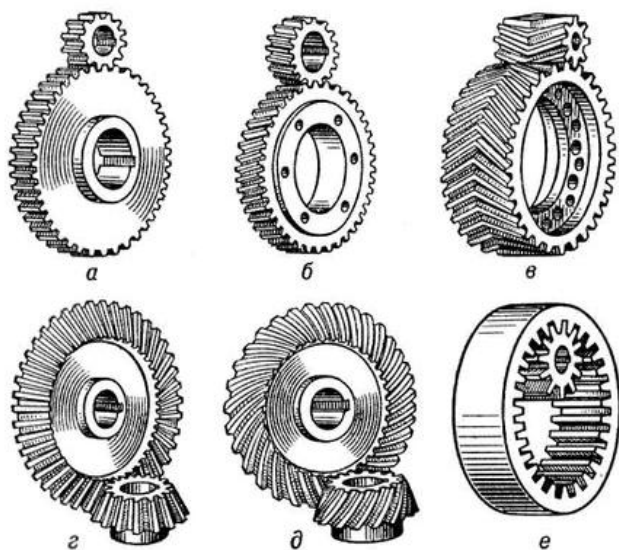


Рисунок 5.1 – Схемы зубчатых передач: а – прямозубая; б – косозубая; в – шевронная; г – коническая; д – с круговым зубом; е – с внутренним зацеплением. Передача Новикова

По конструктивным признакам зубчатые передачи делят на два вида:

- *открытые передачи*, не имеющие кожуха для масляной ванны – защиты колес от грязи и пыли, они имеют возможность взаимных перекосов сопряженных зубчатых колес из-за неточности установки опор валов;

- *закрытые передачи*, замкнутые в общий корпус, который одновременно служит масляной ванной и защитой передачи от попадания грязи и пыли; достаточно точно выдерживается правильность взаимного расположения зубчатых колес.

По эксплуатационному назначению можно выделить четыре основные группы зубчатых передач: отсчётные, скоростные, силовые и общего назначения.

К **отсчётным** относятся зубчатые передачи измерительных приборов, делительных механизмов металлоре-

жущих станков и делительных машин, счётно-решающих механизмов и т.п. В большинстве случаев колёса этих передач имеют малый модуль и работают при малых нагрузках и скоростях. Основным эксплуатационным показателем делительных и других отсчётных передач является высокая кинематическая точность, т.е. точная согласованность углов поворота ведущего и ведомого колёс передачи. Для реверсивных отсчётных передач весьма существенное значение имеют боковой зазор в передаче и колебание этого зазора.

Скоростными являются зубчатые передачи турбинных редукторов, двигателей турбовинтовых самолётов и др. Окружные скорости зубчатых колёс таких передач достигают 60 м/с при сравнительно большой передаваемой мощности. Их основной эксплуатационный показатель - плавность работы, т.е. отсутствие циклических погрешностей, многократно повторяющихся за оборот колеса. С увеличением частоты вращения требования к плавности работы повышаются. Передача должна работать бесшумно и без вибраций, что может быть достигнуто при минимальных погрешностях формы и взаимного расположения зубьев. Для тяжело нагруженных скоростных зубчатых передач имеет значение также полнота контакта зубьев. Колёса таких передач обычно имеют средние модули. Для них часто ограничивают также шумовые характеристики работающей передачи, вибрацию, статическую и динамическую неуравновешенность вращающихся масс и т.п.

К **силовым** относят зубчатые передачи, передающие значительные крутящие моменты при малой частоте вращения (зубчатые передачи шестерённых клетей прокатных станов, подъемно-транспортных механизмов и др.). Колёса для таких передач изготавливают с большим модулем. Основное требование к ним - обеспечение более полного ис-

пользования активных боковых поверхностей зубьев, т.е. получение наибольшего пятна контакта зубьев.

К передачам общего назначения не предъявляют повышенных требований по точности.

При выборе материалов зубчатых колес необходимо обеспечивать:

- высокую прочность зубьев на изгиб;
- высокую стойкость поверхностных слоев материала зубьев против усталостного выкрашивания, износа, заедания и т.д.

В качестве материалов зубчатых колес применяют стали, чугуны, пластмассы.

Основными материалами для зубчатых колес являются термически или химико-термически обрабатываемые стали. Термическую и химико-термическую обработки выполняют для обеспечения высокой поверхностной твердости зубьев, от которой зависят их контактная прочность, износостойкость и противозадирные свойства, при сохранении вязкой сердцевины. При этом, как правило, $H_1 > H_2$ на 20-50 НВ (и более для косозубых и шевронных колес), где H_1 и H_2 - твердость зубьев шестерни и колеса. Это позволяет при равных материалах уменьшить опасность заедания и выровнять ресурс (в часах) зубьев шестерни.

В зависимости от твердости, обусловленной упрочняющей обработкой, стальные зубчатые колеса можно условно разделить на две основные группы:

I группа - колеса твердостью $H \leq 350 \text{ НВ}$;

II группа - колеса твердостью – $H > 350 \text{ НВ}$.

Важно знать, что зубчатые колеса этих групп различны по маркам стали, технологии изготовления и упрочнения и, как следствие этого, по способности к приработке, и самое главное – по нагрузочной способности.

Зубчатые колеса I группы применяют в условиях мелкосерийного и единичного производства при отсутствии

жестких требований к габаритам передачи. Нагрузки на передачу малые или средние. Если при этом передачи косозубые (шевронные), то шестерни должны иметь высокую твердость. Их относим к зубчатым колесам II группы.

Материалы – качественные углеродистые стали 40, 45, 50, 50Г по ГОСТ 1050 и легированные – 40Х, 45Х, 40ХН по ГОСТ 4543 и др.

Для изготовления колес больших размеров применяют стальное литье, среднеуглеродистые стали 35Л-50Л, литейные марганцовистые и низколегированные стали 40ХЛ, 50Г2 и др. после термической обработки - нормализации.

Чугуны: серые СЧ20 и выше, модифицированные и высокопрочные. Чугунные колеса используют в тихоходных, крупногабаритных и открытых передачах. Такие колеса должны быть уже стальных.

С целью уменьшения износа и повышения КПД в несилевых передачах (в приборах) часто применяют колеса из латуни ЛС 59-1.

Пластмассовые зубчатые колеса применяют в паре с металлическими (твёрдостью более HRC 45) в слабонагруженных передачах для обеспечения бесшумности, химической стойкости, самосмазываемости. Материалы - текстолит, древесно-слоистые пластики, капрон и др.

5.2 Возможные причины отказа

В процессе работы зубчатых передач могут наблюдаться следующие виды отказов:

- разрушение рабочей поверхности зубьев, обусловленное контактными напряжениями σ_n (рис. 5.2). Оно может быть усталостного или статического характера соответственно от действия основной и пиковой нагрузок. Усталостное разрушение в виде выкрашивания (питтинга) наблюдается в закрытых хорошо смазываемых и защи-

щенных от попадания абразивов передачах. Причем выкрашивание начинается вблизи полюсной линии на ножках зубьев. Эти поверхности отстающие; и здесь в связи с малыми скоростями скольжения возникают большие силы трения;

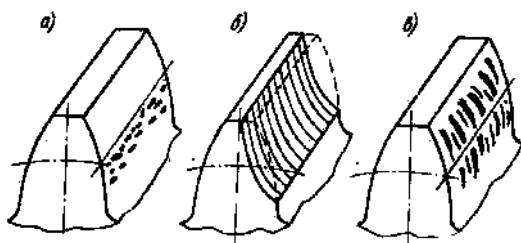


Рисунок 5.2 – Повреждение поверхности зубьев:

а) усталостное выкрашивание; б) абразивный износ; в) заедание

- поломки зубьев, обусловленные напряжениями изгиба. Эти поломки могут носить усталостный или статический характер, и связаны с действием основной и пиковой нагрузки. Этот вид отказа наблюдается в открытых передачах, а также в закрытых передачах мелкомодульными колесами (рис. 5.3);

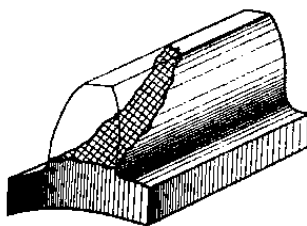


Рисунок 5.3 – Поломка зубьев

- заедание, приводящее к задиру рабочих поверхностей зубьев, наблюдается у тяжелонагруженных тихоходных крупномодульных передачах, что обусловлено большими

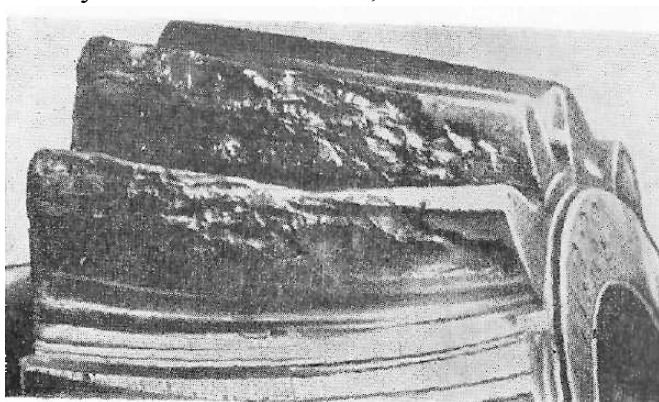
скоростями относительного скольжения. Оно связано с выдавливанием смазочного материала из контакта, локальным нагревом и молекулярным сцеплением контактирующих поверхностей;

- абразивный износ наблюдается в открытых (рис. 5.4) или плохо защищенных от попадания абразивов закрытых передачах. Износ неравномерен по профилю, что обусловлено неодинаковыми скоростями скольжения и контактными напряжениями. Износ приводит к повышению динамической нагрузки и шума, к снижению изгибной прочности зубьев и к их поломке;

- пластическое течение металла под действием сил трения в тяжелонагруженных тихоходных передачах при низкой твердости материала колес;

- повреждение торцов зубьев (рис. 5.5) у передвигжных колес в коробках скоростей.

Критериями работоспособного состояния зубчатых передач являются: поверхностная прочность зубьев (сопротивление контактной усталости), объемная изгибная прочность зубьев (сопротивление усталости и статическая прочность), стойкость против заедания, износостойкость прочности зубьев и к их поломке;



Ри-

сунок 5.4 – Абразивный износ

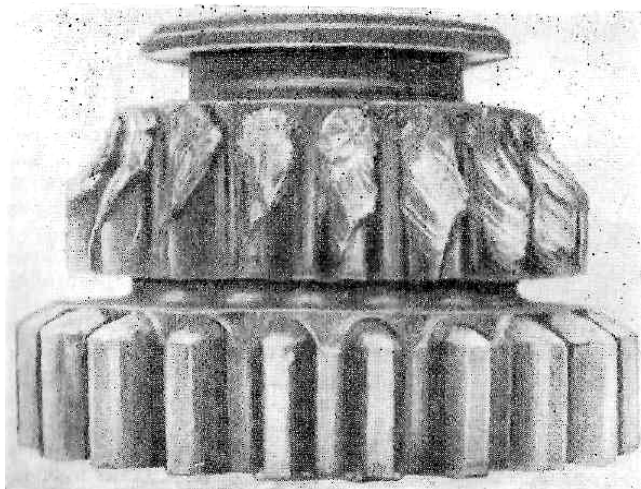


Рисунок 5.5 – Объёмная пластическая деформация торцов зубцов

5.3 Методы повышения работоспособности

Термическая обработка (ТО) с термоулучшением для колес I группы ($H < 350\text{HB}$) должна производиться до нарезания зубьев, что обеспечивает высокую точность колес без отделочных операций. Колеса этой группы хорошо прирабатываются и не подвержены хрупкому разрушению при ударных нагрузках.

Зубчатые колеса II группы ($H > 350\text{HB}$) применяются в массовом и крупносерийном производствах. По сравнению с колесами I группы они имеют значительно большие допускаемые контактные напряжения (в 2 раза) и нагрузочную способность (в 4 раза), а также повышенные износостойкость и стойкость против заедания.

Особенность изготовления колес II группы: термообработка (ТО) или ХТО выполняется после нарезания зубьев. Следует иметь в виду, что отдельные виды ТО или ХТО (объем-

ная закалка, цементация) вызывают коробление зубьев. Для исправления формы зубьев колеса подвергают отделочным операциям.

Так как высокотвердые материалы плохо прирабатываются, они требуют специальной термической обработки, включающую закалку с высоким отпуском, и повышения точности изготовления, повышенной жесткости валов и опор.

До недавнего времени основным видом термообработки являлась объемная закалка. Материалы – стали углеродистые и легированные со средним содержанием углерода 45, 40X, 40XH и т. д. Твердость поверхности зубьев – 45-55 HRC, сердцевина – прочная и невязкая.

Недостатки: коробление, снижение изгибной прочности при ударной нагрузке, ограничение размеров заготовок.

Виды поверхностной ТО и ХТО обеспечивают высокую поверхностную твердость (высокую контактную прочность) и создают в поверхностных слоях остаточные сжимающие напряжения при сохранении вязкой сердцевины (что обуславливают высокую изгибную прочность, особенно при ударных нагрузках).

Основные виды термической и химико-термической обработки зубчатых колес II группы:

- поверхностная закалка с нагревом ТВЧ (для колес малых и средних размеров) или ацетиленовым пламенем. Стали 45, 40X, 40XH (до 50-55 HRC);

- цементация - насыщение углеродом поверхностного слоя металла с последующей закалкой. Стали 15, 20, 20X, 18ХГТ и т. д. (до 58-63 HRC);

- азотирование (насыщение поверхностного слоя азотом) без последующей закалки. Стали 38X2МЮА и др., содержащие молибден; 40XM, 40XHMA. Зубья не шлифуют;

- цианирование (насыщение углеродом и азотом), в

частности нитроцементация, с последующей закалкой. Стали 25ХГТ, 25ХГМ и др. (до 60-63 HRC);

- лазерная закалка (до 64 HRC) не требует сложного легирования сталей, не вызывает коробления.

6 ПОДШИПНИКИ КАЧЕНИЯ

6.1 Общая характеристика, условия работы и область применения

Подшипники качения (рис. 6.1) представляют собой готовый узел, основными элементами которого являются тела качения - шарики 3 или ролики, установленные между кольцами 1 и 2 и удерживаемые на определенном расстоянии друг от друга обоймой, называемой сепаратором 4. В процессе работы тела качения катятся по дорожкам качения колец, одно из которых в большинстве случаев неподвижно. Распределение нагрузки между несущими телами качения неравномерно (рис. 6.1 б) и зависит от величины радиального зазора в подшипнике и от точности геометрической формы его деталей. В отдельных случаях для уменьшения радиальных размеров подшипника кольца отсутствуют (рис. 6.1 в) и тела качения катятся непосредственно по цапфе и корпусу. Подшипники качения широко распространены во всех отраслях машиностроения. Они стандартизированы и изготавливаются в массовом производстве на ряде крупных специализированных заводов.

Достоинства узла:

- сравнительно малая стоимость вследствие массового производства подшипников;
- малые потери на трение и незначительный нагрев;
- высокая степень взаимозаменяемости, что облегчает монтаж и ремонт машин;

- малый расход смазочного материала;
- не требуют особого внимания и ухода;
- малые осевые размеры.

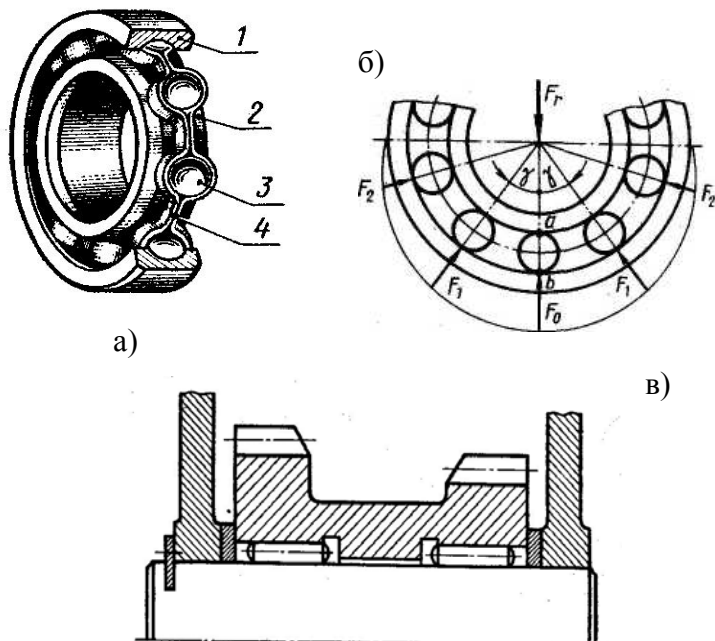


Рисунок 6.1 – Подшипники качения: а) шариковый радиальный подшипник; б) схема распределения нагрузки между телами качения в подшипнике; в) блок зубчатых колес на подшипниках с игольчатыми роликами

Недостатками узлов являются:

- высокая чувствительность к ударным и вибрационным нагрузкам вследствие большой жесткости конструкции подшипника;
- малонадежны в высокоскоростных приводах из-за чрезмерного нагрева и опасности разрушения сепаратора от действия центробежных сил;

- сравнительно большие радиальные размеры;
- шум при больших скоростях.

Подшипники качения классифицируют по следующим основным признакам:

по форме тел качения (рис. 6.2) - шариковые (*a*) и роликовые, причем последние могут быть с цилиндрическими (*б*), коническими (*в*), бочкообразными (*г*), игольчатыми (*д*) и витыми (*е*) роликами;

по направлению воспринимаемой нагрузки – радиальные, радиально – упорные, упорно – радиальные и упорные, для которых особенно неблагоприятно действие центростремительных сил, т.к. они стремятся расклинить кольца;

по числу рядов тел качения – однорядные и многорядные; *по способности самоустанавливаться* – несамоустанавливающиеся и самоустанавливающиеся (сферические);

по габаритным размерам - на серии. Для каждого типа подшипника при одном и том же внутреннем диаметре имеются различные серии, отличающиеся размерами колец и тел качения. В зависимости от размера наружного диаметра подшипника серии бывают: сверхлегкие, особо легкие, легкие, средние и тяжелые.

В зависимости от ширины подшипника серии подразделяются на особо узкие, узкие, нормальные, широкие и особо широкие.

Применение подшипников качения позволило заменить трение скольжения трением качения. Трение качения существенно меньше зависит от смазки. Условный коэффициент трения качения мал и близок к коэффициенту жидкостного трения в подшипниках скольжения. При этом упрощаются система смазки и обслуживание подшипника, уменьшается возможность разрушения при кратковременных перебоях в смазке (например, в периоды пусков, резких изменений нагрузок и скоро-

стей). Конструкция подшипников качения позволяет изготавливать их в массовых количествах как стандартную продукцию, что значительно снижает стоимость производства.

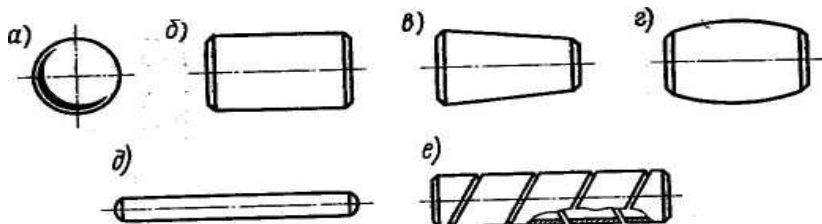


Рисунок 6.2 – Тела качения подшипников:

а – шариковые; б – роликовые и цилиндрические; в – конические; г - бочкообразные; д – игольчатые; е – витые

Применение игольчатых подшипников позволяет уменьшить габариты (диаметр) при значительных нагрузках. Упорный подшипник воспринимает только осевые нагрузки и плохо работает при перекосе оси.

Распределение нагрузки в значительной степени зависит от размера зазора в подшипнике и точности геометрической формы его деталей. Поэтому к точности изготовления подшипников качения предъявляют высокие требования. Зазоры увеличиваются от износа подшипника в эксплуатации. При этом прогрессивно ухудшаются условия работы вплоть до разрушения подшипника.

Возникающие контактные нагрузки в деталях подшипников носят циклический характер при эксплуатации подшипников качения.

Контактные напряжения в подшипнике определяют по расчетным формулам, которые можно найти в справочниках.

С переменными контактными напряжениями связан усталостный характер разрушения рабочих поверхностей деталей подшипника (выкрашивание). Следует отметить, что сопротивление усталости подшипника зависит от того, какое из колец вращается - внутреннее или внешнее. Благоприятным является случай вращения внутреннего кольца (при этом внешнее кольцо неподвижно).

При неточном изготовлении шариков между сепаратором и шариками могут возникать значительные давления и силы трения. С этим связаны износ шариков и сепараторов, увеличение потерь в подшипнике и случаи поломки сепараторов. Это обуславливает также высокие требования к точности изготовления деталей подшипника и сепаратора как одной из этих деталей.

Смазка существенно влияет на долговечность подшипников. Она уменьшает трение, снижает контактные напряжения, защищает от коррозии, способствует охлаждению подшипника. Для смазки подшипников качения применяют пластичные (густые) мази и жидкие масла. Жидкая смазка более эффективна для охлаждения и уменьшения потерь. Необходимое количество смазки для подшипников качения очень невелико. Излишнее количество смазки только ухудшает работу подшипника. Например, если сепаратор погрузить в масло, то оно будет препятствовать его свободному вращению, увеличиваются потери и нагрев подшипника. Подшипниковые узлы необходимо тщательно защищать от попадания пыли и грязи. В противном случае долговечность резко снижается.

Основными материалами для колец и тел качения подшипников являются шарикоподшипниковые высокоуглеродистые хромистые стали ШХ15 и ШХ15СГ. Число в обозначении марки указывает на среднее содержание хрома в десятых долях процента. Среднее содержание углерода

1-1.1 %. Сталь ШХ15СГ содержит дополнительно кремний и марганец, как легирующие элементы.

Широко применяют также цементируемые низколегированные стали 18ХГТ и 20Х2Н4А.

Твердость колец и роликов (кроме витых) обычно 60-65 HRC, шариков 62-66 HRC.

Для работы в условиях высоких температур применяют теплостойкие стали, а при требовании немагнитности - бериллиевую бронзу.

Сепараторы массовых подшипников изготавливают из мягкой углеродистой стали методом штамповки; для высокоскоростных подшипников применяют массивные сепараторы из антифрикционных бронз, анодированного дюралюминия, металлокерамики, текстолита, полиамидов и др. пластмасс.

В условиях ударных нагрузок и высоких требований к бесшумности работы начинают применять тела качения из пластмасс. При этом резко снижаются требования к твердости колец и их можно изготавливать из легких сплавов.

6.2 Возможные причины отказа

Основные причины потери работоспособности подшипников качения:

- **усталостное выкрашивание** рабочих поверхностей тел качения и дорожек качения колец в виде раковин или отслаивания (осповидность) вследствие циклического контактного нагружения (рис. 6.3). Перекатывание тел качения по кольцам связано с образованием в поверхностных слоях контактирующих тел знакопеременных напряжений, которые после определенного числа циклов нагружений приводят к образованию начинающихся от поверхности микротрещин. Последние расклиниваются проникающим в них смазочным материалом, что приводит к вы-

крашиванию. Обычно выкрашивание начинается на дорожках качения наиболее напряженных колец. Усталостное выкрашивание является основным видом разрушения подшипников, обычно наблюдается после длительной работы и сопровождается стуком и вибрациями.

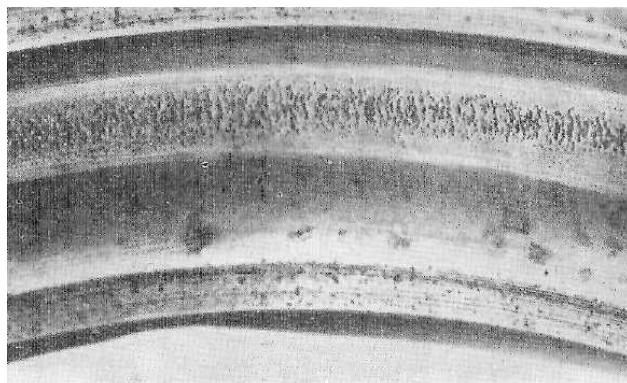
Пластические деформации (бринеллирование) на дорожках качения (вмятины) вследствие действия ударных нагрузок или больших статических нагрузок без вращения при качении связано с местными пластическими деформациями.

При отсутствии вращения рост лунки происходит в связи с коррозией и износом от малых перемещений на площадке контакта при колебаниях, а при вращении - в связи с ударами и развальцовкой.

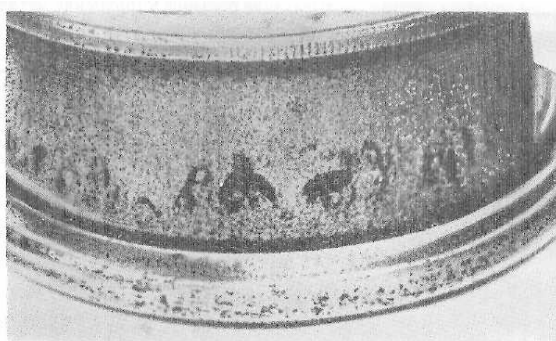
Задиры рабочих поверхностей качения – при недостаточном смазывании или слишком малых зазорах из-за неправильного монтажа.

Абразивный износ – вследствие плохой защиты подшипника от попадания пыли. Применение современных конструкций уплотнений подшипниковых узлов уменьшает износ рабочих поверхностей подшипника.

Разрушение сепараторов – от действия центробежных сил и воздействия на сепаратор тел качения. Воздействия на сепаратор тел качения особенно существенны в подшипниках, работающих с осевой нагрузкой или с предварительным натягом, когда нагружены все тела качения в подшипнике. Тогда тела качения, имея неодинаковый в пределах допуска диаметр, вращаются вокруг оси вала с неодинаковой скоростью, оказывают на сепаратор силовые воздействия, изнашивают его и сами испытывают автоколебания, связанные с неизбежным проскальзыванием. Разница в скоростях тел качения возникает также в результате перекосов осей колец. Клепанные и штампованные сепараторы разрушаются по сечениям, ослаб-



а)



б)

Рисунок 6.3 – Осповидный износ в деталях подшипников качения, развивающийся на глубине до 0,01мм (а) и 0,3 мм (б)

ленным клепками, или по переходным сечениям, подсеченным штампами. Массивные сепараторы разрушаются после износа по перемычкам или по ослабленным сечениям. Возможны отказы подшипников из-за отказов смазки (подшипники с замкнутым объемом смазки и др.). Этот

вид разрушения является основной причиной потери работоспособности быстроходных подшипников.

Раскалывание колец и тел качения – из-за перекосов при монтаже или при больших динамических нагрузках. Из механических разрушений наиболее частым является скалывание бортов у роликоподшипников, связанное с перекосом колец. Значительно реже при больших динамических нагрузках наблюдается раздавливание колец шарикоподшипников, происходящее по дну желоба, или вдавливание шариков. При нормальной эксплуатации разрушение элементов подшипников не должно происходить.

6.3 Методы повышения работоспособности

Одной из главных составляющих надежности деталей машин является их работоспособность. Работоспособностью называется состояние изделия (сооружения, машины, прибора, узла, детали и т.д.), при котором оно способно выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями технической документации (стандартов, технических условий и другой нормативно-технической документации). Требования предъявляемые к деталям машин, без выполнения которых невозможна их нормальная работа, называют основными критериями работоспособности (работоспособного состояния).

Главные критерии работоспособности подшипников качения: циклическая и статическая прочность, контактная усталость, а также износостойкость.

В процессе эксплуатации деталей машин возможны следующие виды изнашивания: механическое (абразивное и усталостное) вследствие пластической деформации; молекулярно-механическое, вызванное поверхностно-активными присадками.

В результате износа изменяются размеры деталей, увеличиваются зазоры, понижается точность движения, уменьшается КПД, возникают дополнительные динамические нагрузки. Большой износ может привести к разрушению детали. Износ детали снижается с повышением твердости и понижением шероховатости трущихся поверхностей и, в особенности, при условии обеспечения жидкостного трения.

Износостойкость обеспечивается соответствующим материалом и твердостью, а также совершенствованием конструкции уплотнений и смазки. Это важный вопрос при конструировании контактных узлов трения.

Шарики или ролики из нитрида кремния обеспечивают работоспособность подшипников качения в условиях особо высоких частот вращения, повышенных температур, а также удовлетворяют требованиям повышенной жесткости, пониженного шума, электрической изоляции. Меньшая по сравнению со сталью плотность нитрида кремния обеспечивает возможность работы с большими частотами вращения и быстрого разгона-торможения. Меньший коэффициент трения обеспечивает пониженную температуру и меньший шум при вращении подшипника. Основными показателями качества подшипников считаются их долговечность и надежность. Под долговечностью в общем случае понимается время в часах, в течение которого подшипники могут работать без признаков усталости металла. Усталость обусловлена периодическими напряжениями, возникающими в металле под воздействием внешних нагрузок в процессе вращения подшипников, и проявляется в поверхностном разрушении деталей (отслаивании или выкрашивании (питтинг) поверхностных слоев). Понятие о надежности подшипников можно трактовать как удовлетворение эксплуатационных требований на протяжении рабочего ресурса, т. е. как понятие о безотказном

ресурсе работы подшипников в течение экспериментально установленного срока при условии соблюдения всего комплекса требований, обеспечивающих работу подшипника в данном устройстве. Работоспособность и долговечность подшипников качения во многом зависят от надежности конструкции и качества материала сепаратора. Долговечность подшипников качения, а следовательно и их работоспособность, в значительной степени определяется качеством тонких поверхностных слоев, находящихся на основных рабочих поверхностях деталей подшипника. Износ и разрушение деталей подшипников происходят по поверхностным слоям, качество которых и определяет долговечность подшипника в целом. Качество, долговечность и работоспособность подшипников, области их применения во многом определяются материалами, из которых изготовлены их детали. Подшипниковые стали должны быть плотны, однородны, с минимальным содержанием неметаллических включений и минимальной карбидной неоднородностью.

Неметаллические включения снижают долговечность подшипников, а при значительной загрязненности ими металла практически невозможно получить высокий класс чистоты поверхности. Наиболее эффективными средствами по снижению содержания вредных примесей в металле являются выплавка в вакуумных печах и электрошлаковый переплав (ЭШП). Пониженное давление в плавильном пространстве печи (ВДП) способствует удалению примесей в газообразном или парообразном состояниях, а также исключает возможность загрязнения переплавленного металла продуктами взаимодействия его компонентов с атмосферными газами. В процессе дугового переплава в вакууме нержавеющие и теплостойкие стали очищаются от неметаллических включений даже более эффективно, чем стали ШХ15. Для сепараторов двухрядных сферических

роликотподшипников применяют металл и пластмассу (полипролактан). Сочетание их в единой конструкции обеспечивает стабильность размеров сепараторов, повышает прочность, износостойкость и антифрикционность. Пластмасса уменьшает трение в подшипнике, увеличивая его износостойкость. Сепараторы изготовляют литьем, что снижает трудоемкость и повышает точность изготовления. Если подшипник будет эксплуатироваться при повышенных температурах, в вакууме, в средах, загрязнение которых смазочными материалами и продуктами износа недопустимо, была выявлена целесообразность при изготовлении сепараторов комбинировать металлы с самосмазывающимися пластмассами.

Смазка является одним из самых важных компонентов для нормальной работы подшипника. Важное условие нормальной работы подшипника - правильный выбор смазки, которая определяет долговечность и надежность подшипника в не меньшей мере, чем материал.

7 ЦЕПНАЯ ПЕРЕДАЧА

7.1 Общая характеристика, условия работы и область применения

Цепная передача состоит из ведущей **2** и ведомой **1** звездочек и цепи **3**, охватывающей звездочки и зацепляющейся за их зубья (рис. 7.1). Применяют также цепные передачи с несколькими ведомыми звездочками. Кроме перечисленных основных элементов, цепные передачи включают натяжные устройства, смазочные устройства и ограждения.

Цепь состоит из соединенных шарнирами звеньев, которые обеспечивают подвижность или «гибкость» цепи.

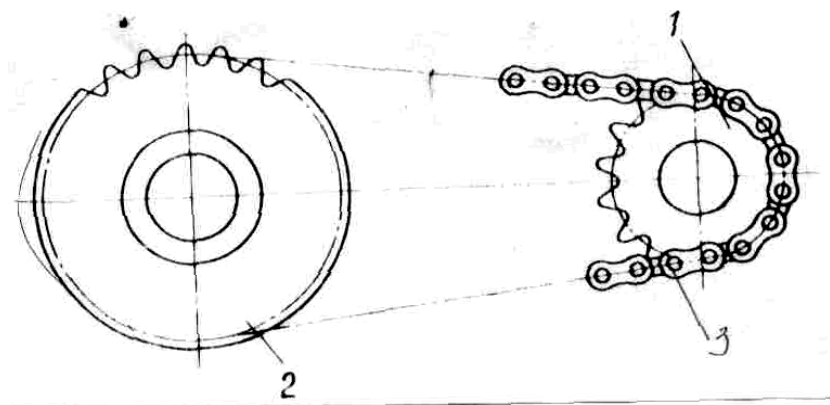


Рисунок 7.1 – Схема цепной передачи

Широко используют цепные передачи в сельскохозяйственных и подъемно-транспортных машинах, нефтебуровом оборудовании, мотоциклах, велосипедах, автомобилях.

Цепные передачи работают в условиях отсутствия жидкостного трения в шарнирах и, следовательно, с неизбежным их износом, существенным при плохом смазывании и попадании пыли и грязи; износ шарниров приводит к увеличению шага звеньев и длины цепи, что вызывает необходимость применения натяжных устройств.

Цепная передача основана на зацеплении, цепи и звездочек. Принцип зацепления, а не трения, а также повышенная прочность стальной цепи по сравнению с ремнем позволяют передавать цепью при прочих равных условиях большие нагрузки (однако меньшие, чем зубчатыми колесами). Отсутствие скольжения и буксования обеспечивает постоянство передаточного отношения и возможность работы при значительных кратковременных перегрузках. Принцип зацепления не требует предварительного натяжения цепи, в связи с чем уменьшается нагрузка на валы и

опоры, угол обхвата звездочки цепью не имеет столь решающего значения, как угол обхвата шкива ремнем. Поэтому цепные передачи могут работать при меньших межосевых расстояниях и при больших передаточных отношениях, а также передавать мощность от одного ведущего вала нескольким ведомым.

Цепные передачи имеют и недостатки. Основной причиной этих недостатков является то, что цепь состоит из отдельных жестких звеньев и располагается на звездочке не по окружности, а по многоугольнику. С этим связаны износ шарниров цепи, шум и дополнительные динамические нагрузки, необходимость организации системы смазки.

Силовая схема цепной передачи (рис. 7.2) аналогична силовой схеме ременной передачи.

Материал и термическая обработка цепных передач имеют решающее значение для их долговечности.

Пластины цепей выполняют из среднеуглеродистых или легированных закаливаемых сталей: 45, 50, 40X, 40XH, 30XH3A твердостью преимущественно 40-50HRC. Изогнутые пластины, как правило, изготавливают из легированных сталей. Детали шарниров – валики, втулки и призмы - выполняют преимущественно из цементуемых сталей 15, 20, 15X, 20X, 12XH3, 20XH3A, 20X2H4A, 30XH3A и подвергают закалке до 55-65HRC. Эти материалы применяют в цепных передачах, потому что от них требуется высокая прочность и они могут подвергаться разным видам термообработки.

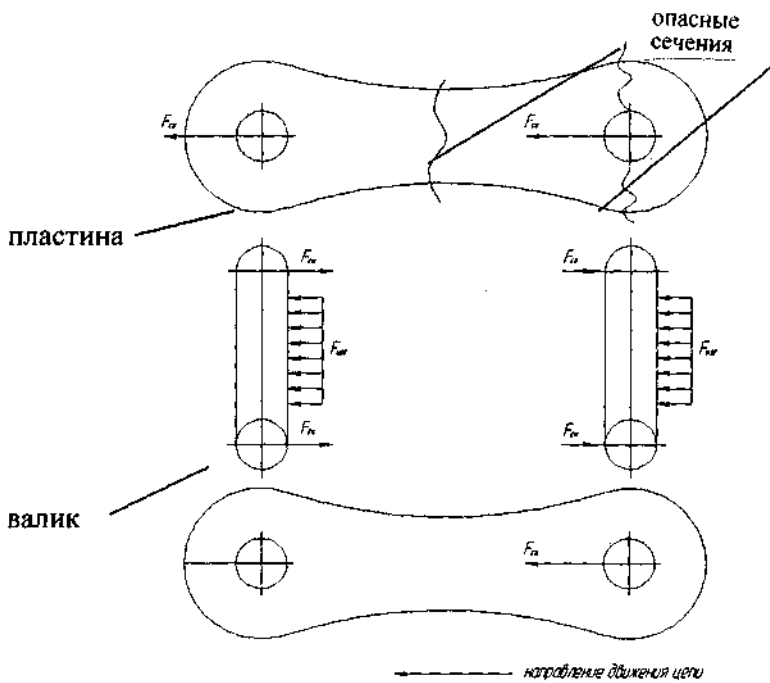


Рисунок 7.2 – Силы, возникающие в звеньях цепи

7.2 Возможные причины отказа

Возможные причины отказов (выхода из строя) могут быть установлены на основе анализа данных эксплуатации деталей, аналогичных проектируемой, и соответствующих литературных источников.

Основными причинами выхода из строя деталей цепной передачи машин могут быть следующие:

- появление пластических деформаций, как объемных так и поверхностных, приводящих к изменению формы и размеров деталей. Это наблюдается при перегрузках и вязком состоянии материала;

- хрупкие разрушения в виде поломок по сечению или повреждений рабочей поверхности. Наблюдаются при перегрузках и хрупком состоянии материала; повреждения усталостного характера в виде поломок или разрушения рабочей поверхности. Они наблюдаются при действии основной нагрузки, вызывающей переменные напряжения.

Основным видом отказа большинства цепных передач является износ деталей шарниров цепи, обусловленный относительными угловыми перемещениями звеньев. В связи с этим шаг увеличивается, цепь удлиняется, шарниры при зацеплении со звездочками поднимаются по профилю зубьев и возможна потеря их зацепления со звездочками.

В скоростных тяжело нагруженных передачах, работающих в закрытых картерах с хорошим смазыванием, наблюдаются усталостные разрушения деталей цепи - роликов, втулок и, особенно, пластин. У многорядных цепей самые слабые детали - промежуточные пластины. Эти повреждения связаны с действием переменных сил и неравномерным распределением нагрузки между пластинами. Кроме того, наблюдается износ зубьев звездочек.

В высокоскоростных передачах возможно заедание шарниров. К видам отказа цепных передач также относятся: проворачивание роликов и втулок в пластинах в местах запрессовки – распространенная причина выхода из строя цепей, связанная с недостаточно высоким качеством изготовления; выкрашивание и разрушение роликов; достижение предельного провисания холостой ветви - один из критериев для передач с нерегулируемым межосевым расстоянием, работающих при отсутствии натяжных устройств и стесненных габаритах.

В соответствии с приведенными причинами выхода цепных передач из строя можно сделать вывод о том, что срок службы передачи чаще всего ограничивается долговечностью цепи.

Долговечность же цепи в первую очередь зависит от износостойкости шарниров.

7.3 Методы повышения работоспособности

Явления нормального изнашивания, ограничивающие сроки службы машин, возникают в результате взаимодействия поверхностей при трении и развиваются на поверхности и в поверхностных слоях, имеющих глубину порядка сотен ангстрем. Состояние поверхностей деталей машин оказывает решающее влияние на их износостойкость. Проблема качества поверхности - одна из актуальных в современном машиностроении. Качество металлических поверхностей определяется их шероховатостью, волнистостью, микроструктурой, свойствами поверхностных слоев и остаточными напряжениями, возникающими в них. Шероховатость поверхностей связана с условиями изготовления деталей и зависит от способов окончательной обработки материалов. Существует большое количество механических, химико-механических, электромеханических и электрических методов обработки поверхностей для получения необходимого микрорельефа поверхностей деталей машин.

Геометрическое состояние поверхности регламентируется ГОСТом 2789-73.

Структура и свойства поверхностных слоев деталей машин зависят от свойств металла и методов его дополнительной обработки. Существуют различные виды упрочняющей технологии: поверхностная термическая обработка, химико-термическая обработка, нанесение износостойких покрытий, поверхностная наплавка, электроискровое легирование и др.

Установление явления структурной приспособляемости при трении дает новый обоснованный подход к разра-

ботке конкретных практических рекомендаций на основе расширения диапазона нормального изнашивания и изменения его уровня. Открываются широкие перспективы для определения степени структурной совместимости различных металлических и других материалов; создания новых материалов; разработки структурных условий антифрикционности и фрикционности; специального легирования сплавов; эффективного применения и разработки новых методов упрочняющей технологии; специального легирования смазочным материалом для работы в экстремальных условиях: условиях вакуума, высоких и низких температур, агрессивных сред.

Интенсивность нормального изнашивания и коэффициент трения в большой мере зависят от сочетания свойств металлов в трущихся парах и их совместимости. При трении высокие показатели износостойкости и антифрикционности имеют сплавы на основе меди, алюминия, олова, цинка, кадмия, свинца. Малыми коэффициентами трения и высокой износостойкостью отличаются также серые антифрикционные чугуны.

В связи с высокими требованиями к современным цепным передачам целесообразно применять легированные стали. Эффективно применение газового цианирования рабочих поверхностей шарниров. Многократного повышения ресурса цепей можно достигнуть диффузионным хромированием шарниров. Усталостную прочность пластин роликовых цепей существенно повышают обжатием краев отверстий. Эффективна также дробеструйная обработка.

В шарнирах роликовых цепей для работы без смазочного материала или при скудной его подаче начинают применять пластмассы.

Ресурс цепных передач в стационарных машинах должен составлять 10-15 тыс. часов работы.

8 УПРУГИЕ ЭЛЕМЕНТЫ МАШИН

8.1 Общая характеристика, область применения и условия эксплуатации упругих элементов

Упругие элементы, в частности пластины прямоточных клапанов и мембраны компрессорных машин, являются одними из основных деталей, работоспособность которых определяет надежность и технический уровень всей машины.

Мембрана используется в мембранных компрессорах, предназначенных для сжатия различных газов высокой чистоты, где она выполняет роль поршня и одновременно изолирует сжимаемый газ от внешней среды и системы привода. Мембрана размещена в мембранном блоке, где она защемляется по контуру между распределительным и ограничительным дисками (рис.8.1), образуя две полости. Одна из полостей сообщается через самодействующие каналы с газовыми коммуникациями, а вторая – с гидравлическим цилиндром. В мембранных компрессорах используются, как правило, многослойные мембраны: рабочие, которые расположены непосредственно со стороны газовой и масляной полостей, и промежуточная.

При работе гидропривода мембране сообщается колебательное движение, в процессе которого она должна плотно прижиматься к профилированной поверхности ограничительного диска, перемещаясь от зоны защемления к центру. В зависимости от конструктивного исполнения отношение величины прогиба в сторону распределительного и ограничительного дисков может быть различно, что характеризует цикл изменения напряжений. В общем случае это цикл является ассиметричным и в процессе эксплуатации материал мембраны подвергается действию циклических знакопеременных нагрузок.

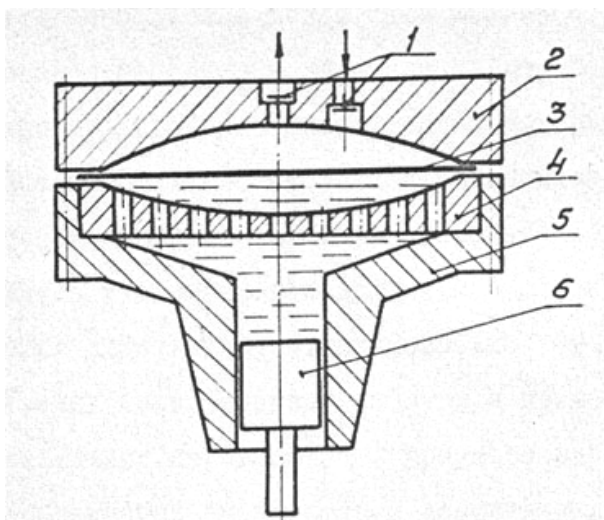


Рисунок 8.1 - Схема мембранного блока:

- 1 – самодействующие клапаны; 2 – ограничительный диск;
 3 - комплект мембран; 4 – распределительный диск;
 5 – корпус; 6 - поршень гидроцилиндра

При перемещении мембраны по профилированной поверхности ограничительного диска материал, вследствие больших контактных давлений, подвергается действию фреттинг-коррозии. Фреттинг-коррозия возникает также между поверхностями рабочих и промежуточных мембран при их относительном перемещении в процессе эксплуатации.

Одной из особенностей эксплуатации мембран является влияние концентраторов напряжений из-за наличия на ограничительном диске радиальных каналов и отверстий под клапаны. Загрязненность сжимаемого газа и продукты разрушения поверхности от фреттинг-коррозии, образуя отложения в зоне защемления мембраны, приводят к концентрации напряжений в данных участках. Попадание в газо-

вую полость частиц металла из газопровода и разрушенных деталей клапанов обуславливает концентрацию напряжений в локальных объемах материала мембран.

Применение для изготовления мембран материала с наличием неплоскостности приводит к нарушению динамики ее работы и образованию "мертвых" зон (рис.8.2), в которых резко увеличиваются напряжения.

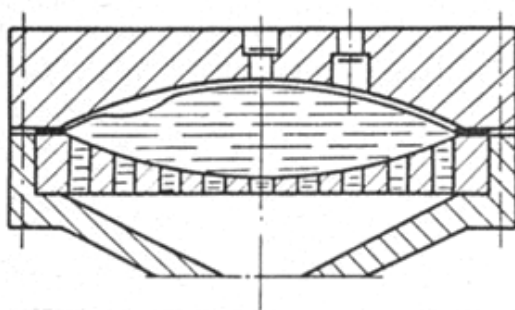


Рисунок 8.2 - Схема образования "мертвых" зон из-за неплоскостности мембран

Действие напряжений усугубляется также тем, что на материал мембраны воздействует температура сжимаемого газа, которая составляет 150°C и может достигать непосредственно в полости сжатия газа до 300°C .

Пластины прямоточных клапанов являются основным элементом клапана и служат для соединения рабочей полости цилиндра компрессора с соответствующим газопроводом в периоды всасывания и нагнетания газа. Прямоточные клапаны относятся к самодействующим и устанавливаются главным образом на ступенях компрессоров с перепадом давлений до 30 кгс/см^2 . Клапан собирается из седел, между которыми по П-образному контуру зажимается упругий элемент - пластина. На рабочей поверхности седла расположены проточные каналы для пропуска газа, а на тыльной стороне, которая служит ограничителем при

перемещении упругого элемента, сделано широкое углубление с клиновидным скосом (рис.8.3). Клапаны открываются под действием разности давлений, а закрываются за счет усилия самопружинающей пластины, которое определяется свойствами материала и величиной поперечной неплоскостности (желобчатости). Оптимальная величина желобчатости для обеспечения достаточной плотности клапана должна составлять 0,2-0,3 мм, однако данным требованиям поставляемая лента не удовлетворяет. При ширине ленты 60 мм желобчатость составляет 1 мм и более, что приводит к возникновению напряжений в материале пластины при сборке клапана и нарушению динамики ее работы в процессе эксплуатации.

При открытии клапана пластина прямооточного клапана первоначально вступает в контакт с ограничителем в зоне пересечения двух плоскостей профилированной поверхности, а затем линия контакта перемещается по плоскости клиновидного скоса до полного открытия клапана (рис.8.4). По окончании процесса всасывания пластина соударяется с рабочей поверхностью седла, при этом динамические нагрузки существенно зависят от скорости движения поршня.

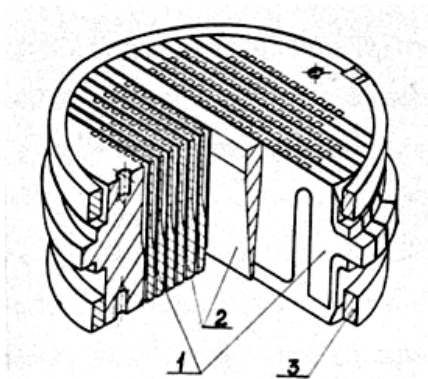


Рисунок 8.3 - Конструкция прямооточного клапана типа ПИК: 1 – седло; 2 – пластина; 3 – кольцо

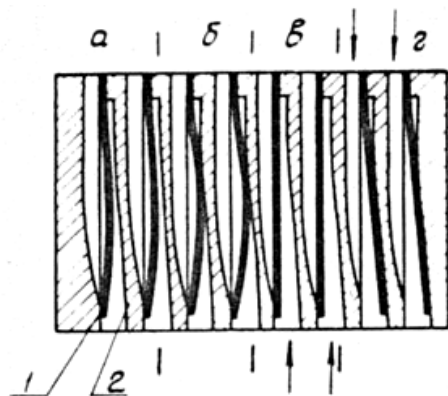


Рисунок 8.4 - Положение упругого элемента (1) между седлами-ограничителями (2): а – нерабочее положение, желобчатость 0,2 мм; б - желобчатость 0,5 мм; в - положение «закрыт»; г – «открыт»

Таким образом, в процессе эксплуатации пластина прямооточного клапана испытывает действие циклических знакопеременных нагрузок в зоне защемления, контактных при отклонении к ограничителю и динамическим в зоне соударения незащемленного края языка пластины о седло. Данные нагрузки действуют в условиях повышенных (до 200°С) температур. Наличие различного рода концентраторов из-за деформации седел, неплоскостности пластин и седел и попадания инородных тел приводят к локализации напряжений в малых объемах материала упругого элемента. Действие таких напряжений практически не учитывается в конструкторских расчетах, выборе марки материала, его структуры и свойств.

8.2 Возможные причины отказа упругих элементов

Решение вопроса повышения надежности упругих элементов компрессорных машин невозможно без данных об эксплуатационной долговечности, основных типах и при-

чинах их разрушения, а также без исследований о соответствии структурного состояния материала условиям нагружения при эксплуатации.

Повреждения мембран, которые приводят к отказу эксплуатируемых компрессоров, можно разделить на три вида: разрушение с образованием трещин, пластическая деформация материала мембран с образованием гофр и разрушение поверхности мембран от действия фреттинг-коррозии.

Разрушение мембран с образованием трещин может происходить как в периферийной, так и центральной зонах (рис.8.5). Причиной образования трещин является действие значительных напряжений из-за наличия концентраторов напряжений на сопряженной профилированной поверхности ограничительного диска, где расположены радиальные канавки и отверстия клапанов. С точки зрения действующих напряжений наиболее опасными являются центральная и зона защемления. Образование трещин может происходить по причине попадания инородных частиц в газовую или масляную полость (продукты разрушения клапанов, шлак из трубопроводов, загрязнения жидкости).

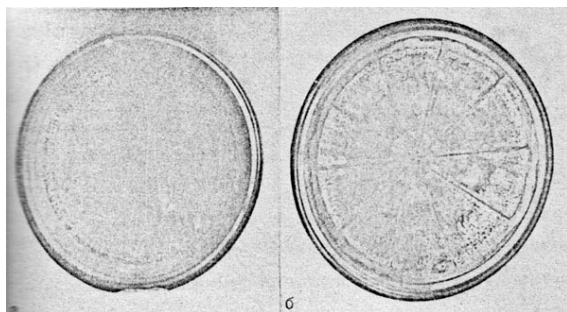


Рисунок 8.5 - Разрушение с образованием трещин в центральной зоне (а) и зоне защемления (б) мембран

Наличие концентраторов напряжений из-за скопления продуктов загрязнения сжимаемого газа в зоне заземления также приводит к возникновению трещин.

При исследовании материала разрушенных мембран, изготовленных из высокопрочной стали 09Х15Н8Ю, было установлено, что на одних и тех же компрессорных установках долговечность мембран была различной при наличии отложений в зоне заземления или попадания инородных частиц равного размера, то есть материал мембран находился в идентичных условиях нагружения, а долговечность существенно различалась.

При металлографическом анализе не обнаруживается существенных отличительных признаков в характере разрушения для материалов с различным уровнем эксплуатационной долговечности. Фрактографический анализ поверхности разрушения позволил определить различия в характере разрушения материала. Так, для мембран с меньшей долговечностью характерен хрупкий излом в зоне зарождения трещины, а для мембран с большей долговечностью наблюдается вязкий характер разрушения с наличием усталостных бороздок (рис.8.6).

Проведенный количественный фазовый анализ рентгеноструктурным методом показал, что структура материала мембран двухфазная аустенитно-мартенситная, но отличается соотношением аустенита и мартенсита. Мембраны с вязким характером излома содержат в исходной структуре 40-50% остаточного аустенита, в то время как для материала с хрупким разрушением характерно более высокое (до 80%) содержание мартенсита деформации в структуре. Одновременно были определены механические свойства материалов разрушенных мембран при температурах 20 и 150°С, которые показали, что механические свойства существенно отличаются. В таблице 8.1 приведены два наиболее характерных примера, из которых видно, что при

рабочих температурах происходит изменение механических свойств материала с различной интенсивностью.

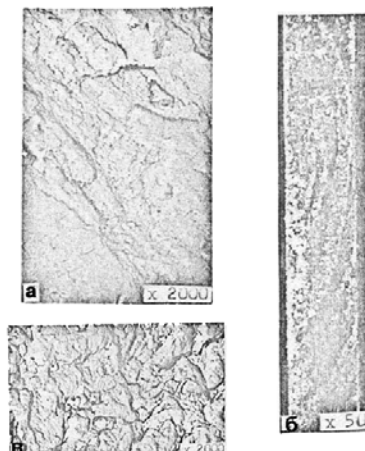


Рисунок 8.6 – Макро- и микроструктура поверхности излома с хрупким (а) и вязким (б, в) характером разрушения материала мембран из стали 09X15H

Таблица 8.1. Физико-механические свойства разрушенных мембран из стали 09X15H8Ю

Характер разрушения	Содержание γ -фазы, %	Механические свойства при температуре			
		20°C		150°C	
		σ , МПа	δ , %	σ , МПа	δ , %
Вязкий	50	$\frac{1080}{730}$	13	$\frac{920}{750}$	8
Хрупкий	25	$\frac{1260}{1040}$	11	$\frac{1150}{1080}$	2
Примечание. В числителе указаны значения предела прочности, в знаменателе - предела текучести					

Сопоставление полученных результатов анализа позволяет предположить, что при действии на материал мембраны циклических нагрузок и наличии концентраторов напряжений структурное состояние материала одних мембран обладает способностью для релаксации локальных напряжений, а для других, при действии локальных напряжений, обнаруживается склонность структурного состояния материала к хрупкому разрушению.

В процессе исследования было установлено, что при эксплуатации часто происходит разрушение мембран из-за наличия неметаллических включений выше 3 балла и их скоплений как на поверхности, так и в основе материала. При этом долговечность мембран составляла 100 часов и менее независимо от структурного состояния материала ленты.

Одной из особенностей мембраны является то, что малая ее толщина (до 0,5 мм) предопределяет значительный вклад качества поверхностного слоя в прочностные и усталостные свойства при действии циклических знакопеременных нагрузок. Поэтому наличие вышеуказанных дефектов служит источником зарождения трещины и для улучшения качества проката ленты необходимо применять рафинированную сталь, что позволит уменьшить ликвационную неоднородность, содержание неметаллических включений и повысить усталостную прочность, а также и сопротивление металла развитию трещины.

Вторым видом разрушения является пластическая деформация мембран с образованием гофр и последующим разрушением в зонах перегиба. Происходит оно по причине образования "мертвых зон" между мембраной и профилированной поверхностью ограничительного диска мембранного блока вследствие упреждения в перекрытии отверстий нагнетательного клапана или перепускных каналов центральной зоны, то есть из-за нарушения динамики

движения мембран. Наличие неплоскостности в мембранах и воздействие температуры сжимаемого газа, приводящее к анизотропному расширению материала, также могут приводить к нарушению динамики ее работы и образованию "мертвых зон".

Разрушение мембран в эксплуатации из-за повреждения поверхности от фреттинг-коррозии наблюдается при долговечностях более 1000 часов работы. Фреттинг-коррозия происходит преимущественно в зоне контакта мембраны с профилированной поверхностью мембранного блока (рис.8.7) и зоне защемления. В указанных зонах происходит разрыхление поверхности и образуются концентраторы, в результате чего снижается сопротивление материала циклическим нагрузкам.

Разрушенные частицы металла поверхности адсорбируются в зоне защемления мембраны, образуя отложения, которые при достаточном их количестве могут стать концентраторами напряжений и приводить к усталостному разрушению материала в данной зоне.

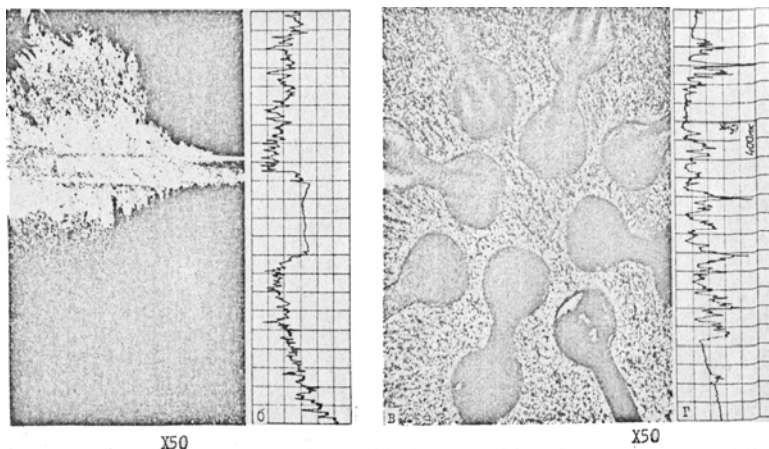


Рисунок 8.7 - Макростроение и профилограммы поверхности материала мембран в зоне контакта, где расположены канавки (а, б) и отверстия нагнетательного клапана (в, г)

Основная причина отказов (более 90%) прямооточных клапанов при эксплуатации связана с разрушением его упругого элемента - пластины.

Исследование разрушенных пластин прямооточных клапанов позволило из всего разнообразия разрушений установить три основных типа.

Разрушение свободного конца "языка" пластины (рис.8.8) связано с явлением удара этой части пластины о поверхность седла. Динамические напряжения при этом зависят от давления газа и частоты вращения вала компрессора. При ударе кромки пластины о седло, вследствие неплоскостности пластин, а также неровностей поверхности седла, ударные напряжения будут распределены неравномерно и в соответствующих зонах будет возникать концентрация напряжений.

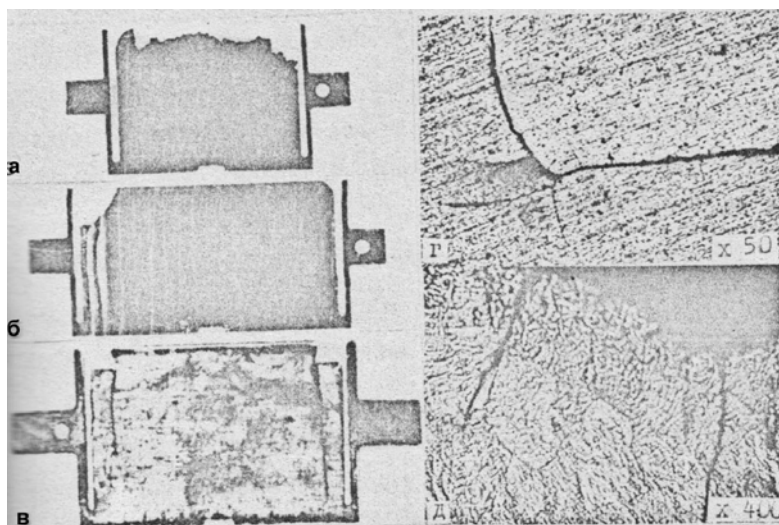


Рисунок 8.8 - Общий вид (а, б, в) и характер развития трещин (г, д) в зоне удара свободного конца языка пластины

Разрушение в средней части "языка" пластины бывает двух видов. Первый из них встречается довольно редко и происходит из-за разрушения седла в процессе эксплуатации вследствие некачественного изготовления или значительных деформаций при сборке клапана. Второй вид разрушения в средней по высоте части языка пластины связан с тем, что при открытии клапана пластина вступает в контакт с ограничителем по линии перехода паза в клиновидный скос. При этом в результате развития процессов контактной коррозии и действия знакопеременных напряжений при циклических контактах об ограничитель в пластине накапливаются повреждения, приводящие к ее разрушению. Разрушение носит преимущественно усталостный характер и может развиваться как с края, так и в середине (по длине) пластины из-за неравномерности контакта.

Разрушение пластины по линии заземления связано с неподвижной посадкой и действием знакопеременных изгибных напряжений.

Наблюдаемое в эксплуатации разрушение пластин прямоточных клапанов в различных зонах позволяет предположить, что в процессе работы клапана идет одновременно накопление повреждений в этих зонах, однако скорость их накопления неодинакова. Разрушение избирательно наступает там, где накопление повреждений достигло своего критического значения. Если же скорости накопления повреждений в различных зонах равны, то критическое состояние в этих зонах может быть достигнуто сравнительно одновременно и в результате наблюдаются сложные разрушения пластин. Накопление повреждений должно зависеть от структурного состояния материала пластин, вида и уровня действующих нагрузок.

Проведенные исследования структуры материала и микротвердости в разных зонах пластин, претерпевших разрушение в процессе эксплуатации, подтверждают вер-

ность такого предположения. Так, например, результаты рентгеноструктурного анализа показывают, что в зависимости от величины поперечной неплоскостности (желобчатости), которая приводит к перераспределению напряжений в пластинах клапанов, в структуре материала стали переходного класса происходит различная степень мартенситного превращения при действии знакопеременных и ударных нагрузок. На рис. 8.9 приведены дифрактограммы зон разрушения пластин, из которых видно, что интенсивность аустенитно-мартенситного превращения зависит от действующих нагрузок и предопределяет зону разрушения. При большой величине желобчатости в зоне контакта пластины с ограничительной плоскостью уже при сборке клапана возникают технологические напряжения изгиба. В процессе работы клапана, при его открытии, пластина первоначально перегибается в данной зоне и, вследствие увеличения жесткости из-за новой точки опоры, свободный конец языка пластины не прилегает к ограничительной плоскости. В результате при движении потока газа, происходят дополнительные колебания пластины относительно зоны контакта. Возникающие при этом напряжения, накладываясь на основные, могут обуславливать разрушение в этой зоне.

При анализе свойств материала пластин из стали 09Х15Н8Ю, как и для мембран, было обнаружено значительное их различие как по структурному состоянию, так и по уровню механических свойств. При этом более высокому уровню механических свойств соответствует меньшая степень изменения в процессе эксплуатации и разрушение пластин происходит при меньших значениях долговечности, особенно в случае попадания инородных тел под пластины. При локализации напряжений из-за попадания инородных тел разрушение может происходить в любой зоне пластины.

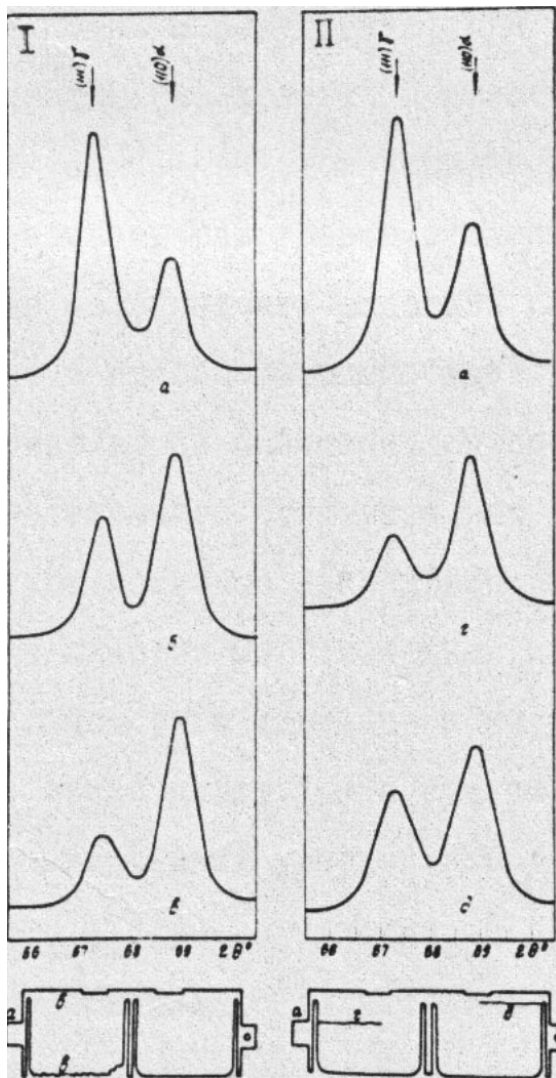


Рисунок 8.9 - Дифрактограммы стали 09X15H8Ю с величиной желобчатости пластин 0,2мм (I) и 0,8мм (II) в исходном состоянии (а) и зонах защемления (б, д), удара (в), средней части (г) после разрушения

Таким образом, циклический характер действующих знакопеременных, контактных и динамических напряжений в соответствующих зонах, а также структурное состояние материала являются основными факторами, определяющими эксплуатационную долговечность упругих элементов компрессорных машин.

8.3 Методы повышения работоспособности

На основании проведенной классификации и установленных причин отказов из-за разрушения упругих элементов возможно определить пути увеличения их долговечности, которые разделяются соответственно на конструкторско-технологические, эксплуатационные и металлургические.

Конструкторско-технологические: расчет оптимального профиля ограничительной поверхности перемещения пластин клапанов мембран; обеспечение равномерного перемещения мембран без образования мертвых зон; выбор материала контактирующих пар; разработка оптимального усилия затяжки шпилек мембранного блока и регламентированного усилия посадки стяжного кольца.

Эксплуатационные: обеспечение монтажа мембран без попадания между ними и в рабочей полости инородных тел; контролировать усилия и равномерность затяжки шпилек мембранного блока; применять в технологических линиях фильтры тонкой очистки сжимаемого газа; не допускать повышения рабочей температуры.

Металлургические: применять рафинирующие методы выплавки материалов для пластин клапанов и мембран; разработки методов по созданию структурного состояния материала, способного хорошо сопротивляться процессам фреттинг-коррозии, зарождению и развитию трещин при циклических нагрузках с учетом действия повышенных

температур; обеспечение малой величины шероховатости поверхности материала и разработки способа получения мембран с малым значением величины неплоскостности; разработки техпроцесса изготовления ленты со стабильными физико-механическими свойствами в состоянии поставки.

9 ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Анализ усталостных изломов показывает, что в абсолютном большинстве случаев очаг разрушения находится в наиболее напряженной поверхностной зоне металла, а характер разрушения зависит в значительной степени от качества и чистоты поверхности изделия и наличия дефектов, являющихся концентраторами напряжений. Поэтому для повышения долговечности металла, работающего при знакопеременных нагрузках, необходимо создание прогрессивной технологии изготовления детали, обеспечивающей предотвращение возникновения поверхностных дефектов: микротрещин, прижогов и др.

Без всякого сомнения, необходимо прежде всего правильно выбрать марку стали для изготовления детали, работающей в конкретных условиях по сило- и теплонагруженности.

Соблюдение технологии выплавки, разливки и кристаллизации стали обеспечивает металлургическое качество металла. Чем чище металл по неметаллическим включениям, тем менее проявляются карбидная ликвация, сегрегация по химическому составу и тем выше сопротивление стали усталостному разрушению. Чем меньше вредных примесей, лучше раскисление и условия кристаллизации, тем меньше усадочные раковины, рыхлоты, флокены и

тем, конечно, в меньшей степени они способны быть очагами преждевременных разрушений.

При операциях механической обработки поверхности несоблюдение технологии может привести к локальным прижогам при шлифовании или сварке; зоны перегретой структуры высокой твердости могут явиться очагами хрупкого разрушения.

В процессе термической обработки перегрев способен вызвать появление Видманштеттовой структуры, а неправильные режимы пламенной или индукционной поверхностной закалки деталей с резкими переходами, изготовленных из стали с низкой прокаливаемостью, могут привести к трещинам, которые, не выявляясь при дефектоскопическом или магнитном контроле, могут стать очагами преждевременных усталостных разрушений. Повышению усталостной прочности элементов конструкции способствуют обкатка поверхности роликами, обдувка дробью создает наклеп в поверхностном слое, где возникают остаточные сжимающие напряжения. Равномерное распределение дислокаций определенной плотности положительно сказывается на усталостной прочности, поскольку снижается чувствительность стали к концентрации напряжений. 100%-ный дефектоскопический контроль металла и сварочного шва позволяет выявить микротрещины, а деталь или забраковать, или отремонтировать путем заварки трещин.

При эксплуатации необходимо не допускать перегревов, механических перегрузок детали и работы металла в коррозионно-активной среде (особенно коррозия под напряжением), снижающей сопротивление усталости. Если среда является обязательным условием эксплуатации, то необходимо правильно выбрать способ поверхностной защиты, гарантирующий стойкость против коррозии.

Эффективным способом повышения усталостной прочности является поверхностное упрочнение металла химико-термической обработкой.

Статистика повреждений и аварий с оценкой причин разрушения (уровень нагрузок, температура, наработка, топография очага и зон излома, среда, изменение свойств и др.) позволяет уточнить коэффициент запаса прочности, марку стали и наметить эффективные мероприятия по профилактике разрушений, а следовательно, - повышению долговечности и надежности конструкции.

Важная роль принадлежит конструкторам и технологам, которые должны выбрать марку стали для конкретной детали, обладающей высоким пределом выносливости и сопротивлением хрупкому разрушению. Они должны путем определения допускаемых напряжений и запасов прочности учесть влияние известных и неучтенных факторов, обеспечивающих безаварийную работу конструкции в течение заданного срока службы. Роль концентраторов напряжений должна быть сведена к минимуму.

Таким образом, для предотвращения усталостного разрушения конструкции необходимо обеспечить при проектировании, изготовлении и сборке соблюдение следующих условий:

- а) правильный выбор материала;
- б) использование конструктивных форм, не вызывающих значительной концентрации напряжений;
- в) выбор допускаемых напряжений в соответствии с нормами, обеспечивающими достаточный запас прочности с учетом усталости металла;
- г) обеспечение соответствующего технического контроля при изготовлении и сборке конструкции.

В работе Школьника Л.М. указывается, что большое значение при проектировании конструкции следует уделять не только прочности, но и живучести металла, связан-

ной со скоростью распространения трещин от зарождения до разрушения изделия. Для повышения прочности и живучести необходимо:

а) применение стали с высоким сопротивлением развитию трещин, достигаемым за счет упрочнения поверхностных слоев, благоприятной текстуры, градиентов изменения механических свойств и структуры;

б) применение перфорированных пластических элементов конструкции вместо сплошных по ходу возможного развития трещины для ее торможения у отверстия;

в) введение в конструкцию ряда параллельно нагружаемых элементов, а также слабого звена, при разрушении которого от усталости конструкция сохраняет работоспособность, но сигнализирует о локальном разрушении;

г) обеспечение минимально необходимой остаточной прочности конструкции при наличии трещины до критических размеров.

Для повышения работоспособности лопаток, изготовленных из промышленных жаропрочных сплавов, на основании комплексного исследования предложено ряд условий. Так, путем перехода от обычной (воздушной) к вакуумной индукционной выплавке и дуговому переплаву повышаются качество и чистота металла в отношении металлургических дефектов, таких как неметаллические включения, содержание газов и примесей; уменьшается анизотропия свойств, что в конечном итоге приводит к повышению предела выносливости и других механических свойств.

Повышение точности штамповок лопаток с припуском 0,5-0,8 мм достигается повторными зачистками, калибровкой, стойкостью штампов. Кузнечный нагрев и термическую обработку проводят в защитной атмосфере для предохранения поверхностного слоя от разупрочнения. Показано, что электрохимическая обработка поверхности пера

лопатки без последующих шлифования и полирования абразивной лентой на копировальных станках наиболее прогрессивна, так как обеспечивает точность геометрии поверхности и стабильность состояния поверхностного слоя без наклепа и остаточных напряжений, что положительно сказывается на надежности лопаток в эксплуатации.

Прогрессивными средствами химико-термической обработки пера лопатки являются термодиффузионное алитирование и хромоалитирование, создающие антикоррозионное покрытие при наличии остаточных сжимающих напряжений, положительно сказывающихся на пределе выносливости. Нанесение жаростойкой эмали на поверхность также способствует повышению коррозионной стойкости металла.

В.С.Иванова считает, что для максимального использования прочности, обусловленной силами связи данного материала, необходимо создание такого структурного состояния, которое обеспечивало бы максимальную задержку дислокаций и минимальный их выход на поверхность. Повышение уровня прочности может быть достигнуто рациональным легированием, приводящим к увеличению сил межатомной связи, и повышению способности металла запасать подводимую энергию (создание структурного состояния, обеспечивающего максимальную задержку дислокаций в металле). Способы задержки дислокаций в металле при деформировании можно разделить на две группы:

а) создание внутренних дислокационных барьеров (границы зерен, двойники, границы раздела фаз, лес дислокаций, мелкодисперсные выделения и др.);

б) создание внешних дислокационных барьеров (упрочнение поверхностных слоев, окисные пленки, покрытия).

Таким образом, детальное изучение топографии усталостных изломов, сравнение изломов лабораторных образцов деталей после аварийного разрушения позволяют выявить, при каких эксплуатационных нагрузках и температурах произошло разрушение, как оно развивалось во времени, что очень важно для оценки эксплуатационной надежности элементов конструкций и принятия необходимых мер для предупреждения разрушений.

***10 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ
«ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ОТКАЗОВ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН»***

Для тщательного изучения причин отказов и повреждений деталей машин рекомендуется соблюдать определенную процедуру (рис. 10.1), которая может меняться в зависимости от условий работы, причин работы, работоспособности детали и конечной цели исследования. К сожалению, как промышленность, так и институты недостаточно акцентируют внимание на необходимости осуществления анализа повреждений и распространения информации по этим вопросам. Очень важно, чтобы даже в пределах отдельной организации сведения по анализу повреждений и выводы по ним были в достаточной и доступной мере переданы конструкторам и технологам, чтобы они могли использовать изменения в своей сфере для улучшения качества продукции и осуществления должного контроля.

На способ исследования и его результаты оказывает влияние индивидуальная квалификация специалиста. Поэтому весьма целесообразным является привлечение к анализу повреждений деталей комплексных групп, которые могли бы проводить исследования по напряжениям и дей-

ствующим нагрузкам, особенно учитывая аспекты «физики отказов», которая изучает соответствие исходных свойств конструкционных материалов действующим нагрузкам и закономерности изменения этих свойств в конкретных условиях эксплуатации детали или изделия.



Рисунок 10.1 – Алгоритм диагностики отказов деталей машин

Опыт эксплуатации показывает, что отказ в работе основных деталей технологического оборудования приводит к большим материальным убыткам по причине внеплановых остановок и снижению выпуска продукции. При этом время на внеплановые остановки составляет 4 – 5 % от годового фонда времени эксплуатации оборудования, который составляет в среднем 9000 часов.

Повреждения деталей машин могут вызываться различными причинами (табл. 10.1).

Таблица 10.1 – Основные типы повреждений деталей машин и оборудования

Виды повреждений применяемого материала	
Механические	Коррозионные
Вязкое разрушение	Общая коррозия
Хрупкое или квазихрупкое	Локальная коррозия (язвенная, разъедание пор)
Усталостное разрушение	Межкристаллитная коррозия
Износ, эрозия, кавитация	Газовая (термическая) коррозия
Фреттинг-разрушение	Коррозионное растрескивание под напряжением
Ползучесть местная	
Температурное разрушение	

Не все повреждения материала детали влекут за собой формирование изломов. Например, многие отказы при эксплуатации (повреждения) происходят в результате сильного износа или интенсивной коррозии. Такие повреждения весьма трудно анализировать, так как уже нет того металла, который был раньше, до износа или коррозии и, таким образом, изучение повреждения должно основываться на свойствах оставшегося металла, который не всегда будет представлять собой отсутствующий. Повреждения от износа и коррозии трудно анализировать, так как на эти проблемы влияют факторы, некоторые из которых могут быть неочевидными. Повреждения от износа, которые в широком смысле могут классифицироваться как адгези-

онный и абразивный износ, являются комплексными проблемами. Скорость износа зависит от многих факторов: применяемых материалов контактирующих поверхностей, нагрузки, температуры, скорости скольжения, обработкам поверхности и вида смазки. Установление характера износа поверхности или разрушения материала путём визуального осмотра является первым весьма важным шагом при изучении повреждения детали. Анализ литературных данных позволяет указать основные причины нарушения нормальной работы (отказов) деталей машин, а именно:

- **ошибки в расчётах и проектировании** способствуют возникновению деформаций неуравновешенности (дисбаланса) и вибрации; концентрация напряжений вследствие недостаточных радиусов сопряжений, резкого изменения сечений, наличия острых углов и надрезов;

- **неправильный выбор материала** и режимов термической и дефекты механической обработки;

- **предыстория материала**, способствовавшая формированию дефектов металлургического и технологического характера (загрязнённость металла вредными примесями и неметаллическими включениями; закаты и надрывы, неоднородность деформации и др.);

- **несоблюдение размеров и допусков при изготовлении детали**: дефекты при финишной обработке поверхности (волокнистость, прижоги, разнотолщинность); ошибки при монтаже, сборке и сварных работах, способствующие формированию внутренних напряжений, которые по знаку совпадают с рабочими;

- **дефекты в структуре материала**, возникающие при термической обработке, получении покрытий и химикотермической обработке.

На уровень надёжности работы деталей и узлов машин влияют условия работы, способствующие перегрузками аномальным напряжениям, недостаточный кон-

троль и техническое обслуживание в процессе эксплуатации оборудования.

Из приведённых данных можно отметить, что повреждения деталей машин и механизмов может происходить из-за наличия дефектов, которые имеются в материале уже до ввода в эксплуатацию (плохая свариваемость, конструктивные дефекты), а также повреждения, вызванные непосредственно условиями эксплуатации детали (схема напряженного состояния, износ, коррозия, превышение температуры и нагрузок).

Задачу повышения надежности долговечности деталей машин невозможно решать без эффективной качественной системы технической диагностики причин разрушения как способа управления. Диагностирование характера повреждений деталей машин основывается на изучении кинетики и влияния на него механизма разрушения, а также различного рода дефектов материала.

Основой для диагностирования является **фактография**, которая занимается изучением строения изломов, которые образуются на поверхности детали при её разрушении в результате эксплуатации. Излом в определённой мере представляет собой своеобразную фотографию тех процессов, которые происходили при разрушении исследуемого объёма. В зависимости от задач и характера изучения излома различают виды фактографии.

Поэтому фактография позволяет решать две задачи. **Первая** – идентификация вида разрушения с учётом разновидностей нагружения (статическое, динамическое, повторно - статическое, усталостное, кручение) и степень влияния конструктивных, технологических и структурных концентраторов напряжения, а также дефектов металла.

Фактография

<u>Макро-</u> Стадия фактографического исследования строения изломов, позволяющая определить: характер разрушения (вязкое, хрупкое, транс- или интеркристаллитное); характер действия нагрузок (статическое или циклическое); схему приложения нагрузки (растяжение, сжатие, изгиб, кручение и т. д.); качественные характеристики разрушения (доля хрупкого и вязкого разрушения). Проводится при увеличении до 50 крат методами оптической металлографии (ОМ).	<u>Микро-</u> Проводится с использованием специальных методов исследования электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, микрорентгеноспектрального. Позволяет анализировать механизм разрушения материала и влияние на него формы и размера зёрен, наличие вторичных фаз, структурную неоднородность, анализ зональных напряжений, степень изменения фазового состава.
---	---

Вторая – выявление механизма образования и развития трещины, причины воздействия различных факторов, в частности, условий нагружения, структуры и свойств материала на процесс разрушения.

Методы исследования поверхности разрушения изломов на макро- и микроуровнях дополняют друг друга, и при решении конкретных задач один из них становится определяющим.

Одной из задач при выполнении курсовой работы по дисциплине «Методы структурного анализа» является приобретение практических навыков в диагностике разрушения деталей методами фактографии. Для решения поставленной задачи, согласно заданию варианта, студент должен отразить в отчёте следующие вопросы:

- привести в отчёте схему лаборатории или отдела на предприятии, которая занимается анализом свойств материала и качеством выпускаемой продукции с краткой характеристикой технической оснащённости;

- привести чертёж (эскиз) детали с перечнем технических требований на её изготовление и описать кратко ос-

новые технологические процессы формообразования заготовки и методы последующей механической и термической обработок;

- отразить основные технические характеристики, функциональные задачи и условия эксплуатации узла, в который входят детали, подлежащие исследованию;

- провести исследование для определения вероятных причин выхода из строя детали, согласно алгоритму (рис. 9.1), описать возможные виды отказа;

- на основе проведенного исследования привести рекомендации по устранению причин, вызвавших разрушение детали при эксплуатации;

- сделать выводы о проделанной работе;

- привести список литературных источников и технической документации, которые были использованы в работе.

Примеры выполнения разделов в курсовой работе приведены в приложении А.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)

Пример выполнения ОДЗ

Министерство образования и науки Украины
Сумский государственный университет
Кафедра прикладного материаловедения и ТКМ

ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ
(курсовая работа)
по дисциплине
«Методы структурного анализа металлов и сплавов»

Тема: «Исследование причин разрушения деталей машин – коленчатого вала»

Выполнил: студент группы МТ-41
Ф. И. О.
Проверил: Ф.И.О.

Сумы 2008

Содержание

С

Введение.....	
Задание для курсовой работы.....	
1. Общие сведения о лаборатории для анализа качества материала.....	
1.2 Характеристика лабораторий.....	
1.2.1 Механическая лаборатория.....	
1.2.2 Металлографическая лаборатория.....	
2.2 Задачи и методы исследования макро- и микро-структуры.....	
2.2.1 Методы исследования микроструктуры.....	
2.2.2 Метод фрактографии.....	
3 Применение методов анализа для исследования структуры и свойств материала разрушенного изделия.....	
3.1 Назначение и условия работы изделия.....	
3.2 Исследовательская часть.....	
3.2.1 Анализ химического состава.....	
3.2.2 Анализ механических свойств.....	
3.2.3 Анализ макроструктуры материала.....	
3.2.3.1 Фрактографические исследования.....	
3.2.3.2 Определение химической неоднородности стали.....	
3.3.4 Анализ микроструктуры материала.....	
3.3.5 Выводы по проведенному исследованию разрушения коленчатого вала.....	
3.3.6. Предложения по устранению данного дефекта.....	
Выводы.....	

Введение

Задачу повышения эксплуатационной надежности и долговечности деталей машин и механизмов невозможно решить без эффективной системы технической диагностики причин разрушения. Развитие и внедрение технической диагностики как способа управления качеством способствуют уменьшению расхода металлопроката, снижению затрат на ремонт и простой действующего парка машин и предотвращению различного рода поломок. Диагностирование характера поврежденности и разрушения деталей требует наличия информации об изменении вида изломов материалов в зависимости от напряженного состояния, разнообразных способов нагружения, технологии изготовления деталей и так далее. Способ диагностики основывается на изучении кинетики и влияния на него механизма разрушения, а также природы разного рода дефектов материала.

Для того чтобы готовое изделие было конкурентоспособным и отвечало требованиям ГОСТа, необходимо проводить контроль качества, исследовать и испытывать материал. Для этих целей на каждом предприятии существуют свои исследовательские лаборатории, которые занимаются решением всех этих вопросов.

Успешное решение задач выпуска конкурентоспособной продукции требует подготовки квалифицированных специалистов, обладающих не только глубокими теоретическими знаниями, но и способных использовать их на практике в своей производственной деятельности. Поэтому основной задачей курсовой работы является дать студентам практические навыки в использовании методов оценки качества конструкционного материала, назначенного для изготовления выпускаемой продукции на предприятии. В частности, на основе анализа разрушенных деталей изучить требования к выбору материала и технологиям термической обработки, которые должны формировать структуру и свойства для обеспечения надёжности работы детали при эксплуатации оборудования.

Задание для курсовой работы

По представленной фотографии излома коленчатого вала дать оценку характера разрушения и предложить технологию, предотвращающую такую поломку детали.

1 Общие сведения о лаборатории для анализа качества материала

Лаборатория возглавляется начальником лаборатории, который назначается и освобождается приказом председателя правления предприятия по представлению первого заместителя председателя правления предприятия ил главного инженера.

Работа центральной лаборатории построена по принципу специализации отдельных лабораторий, выполняющих определенные виды работ.

Задачи лаборатории:

- лаборатория как структурное подразделение предприятия должно обеспечивать четкое и своевременное выполнение производственных заданий, контроль качества выпускаемой продукции;

- осуществляет текущий контроль материалов, полуфабрикатов, поступающих в объединение, на соответствие их действующим стандартам и техническим условиям, а также контроль качества деталей, заготовок или изделий, прошедших различные виды технологической обработки;

- совершенствует существующие и разрабатывает новые методы контроля качества материалов;

- участвует в разработке и внедрении новых технологических процессов и совершенствовании существующих с целью повышения производительности труда, повышения качества выпускаемой продукции;

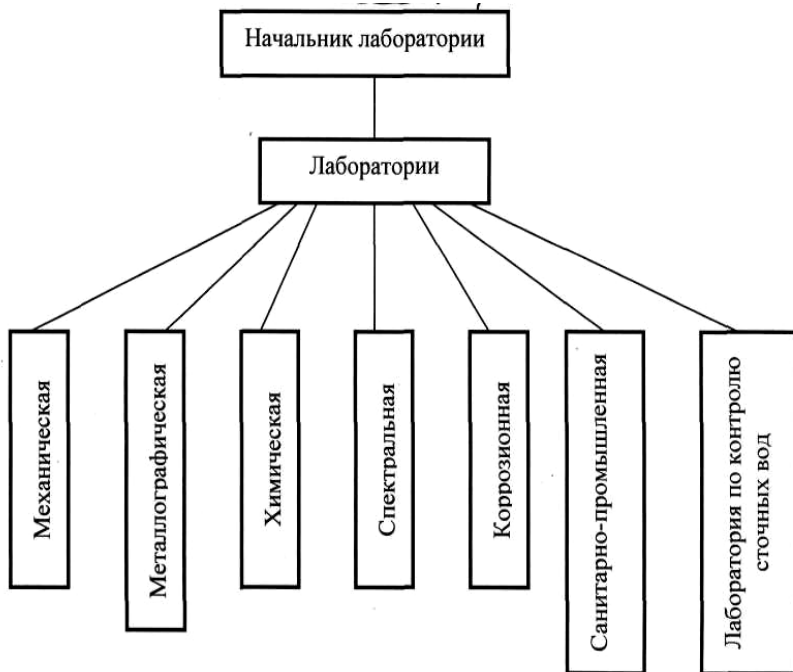


Рисунок 1 - Структура центральной лаборатории предприятия

- осуществляет плановый контроль по содержанию вредных веществ в воздухе производственных помещений, за освещенностью, уровнем шума на рабочих местах, вибрацией виброинструмента;

- участвует и проводит техническую пропаганду в подразделениях объединения по новым материалам, методам их обработки и лабораторным методам контроля;

- осуществляет надзор за испытательными машинами, приборами твердости и лабораторными весами, представляет их на государственную поверку.

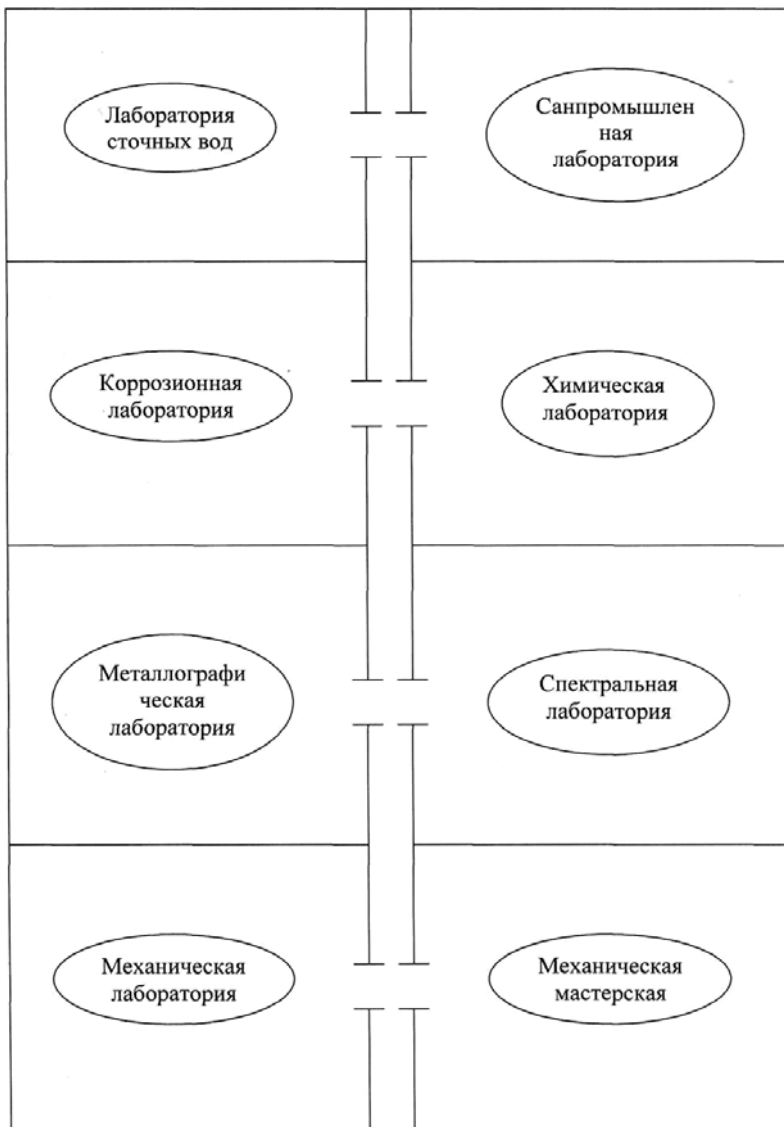


Рисунок 2 - Структурная схема центральной лаборатории

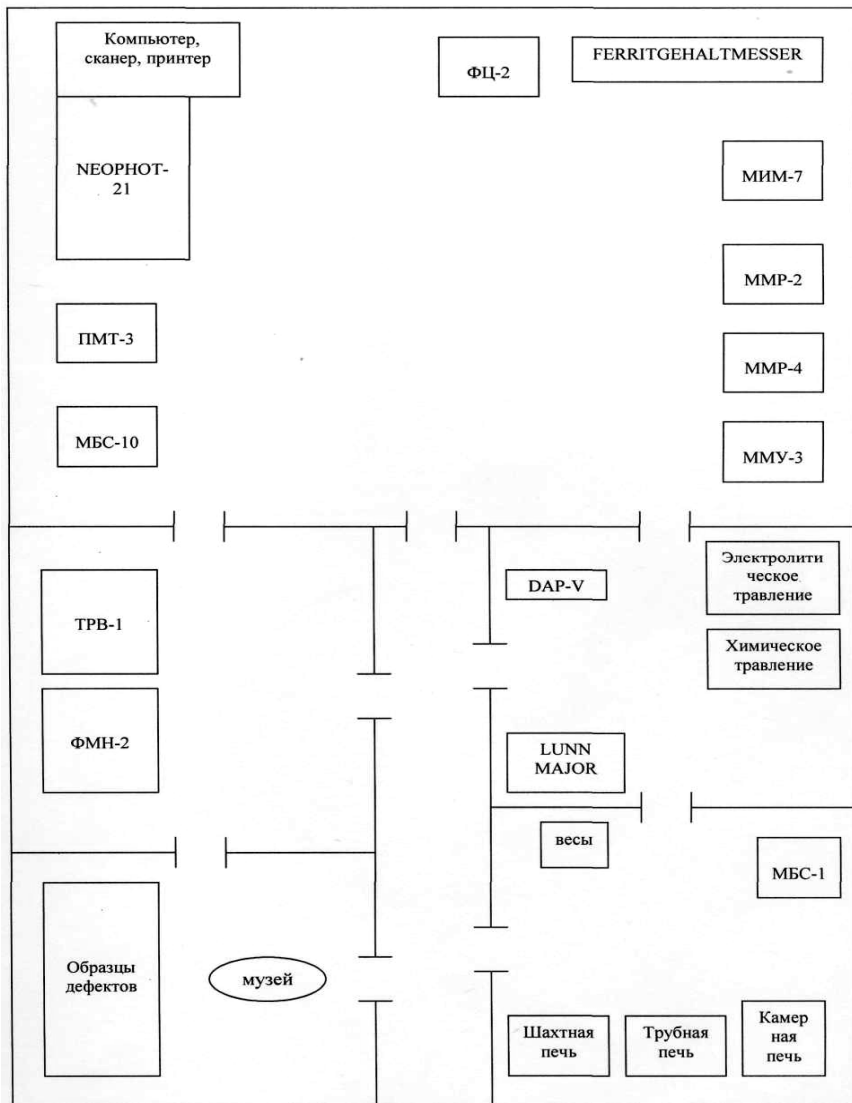


Рисунок 3 - Структурная схема металлографической лаборатории

1.2 Характеристика лабораторий

В состав лаборатории входят следующие подразделения (рис. 2):

1 Механическая лаборатория с участком подготовки образцов.

2 Металлографическая лаборатория.

3 Химическая лаборатория со спектральной группой.

4 Коррозионная лаборатория.

5 Санитарно-промышленная лаборатория.

6 Участок для термообработки образцов.

1.2.1 Механическая лаборатория

Проводит механические и технологические испытания поступающих в объединения материалов, контролирует механические свойства сварных соединений выпускаемой объединением продукции, подземных и надземных газопроводов, поковок, отливок, в соответствии с требованиями нормативно-технической документации.

Внедряет новые и совершенствует существующие виды механических испытаний.

Модернизирует имеющиеся оборудования и приборы с целью наилучшего их использования.

Проводит опытно-экспериментальные работы совместно с другими лабораториями по выбору материалов.

Проводит систематический надзор за правильностью показаний твердомеров и испытательных машин в лаборатории и в цехах объединения, осуществляет ведомственную проверку и своевременно представляет их на государственную поверку.

1.2.2. Металлографическая лаборатория

Осуществляет металлографическое исследование сталей, чугунов, цветных металлов, а также сварных соеди-

нений на соответствие их действующим стандартам или техническим условиям.

Контролирует качество термической обработки деталей.

Совместно с цехами и отделами проводит работу по совершенствованию технологииковки, штамповки, термообработки и сварки.

Участвует в установлении причин брака деталей после различных технологических переделов и предлагает рекомендации по предотвращению брака.

Участвует в проведении исследования материалов деталей и узлов машин с целью выяснения причины и предупреждения выхода их из строя.

Структурная схема металлографической лаборатории представлена рис. 1.3, где указано:

- оборудование;
- микроскопы;
- оптический фотомикроскоп НЕОРНОТ 21 и аппаратно-программный комплекс;
- ММР 4 - микроскоп металлографический рабочий с увеличением до 1000 крат;
- ММР 2 - микроскоп металлографический рабочий с увеличением до 500 крат;
- ММУ 3 - микроскоп металлографический упрощенный с увеличением до 480 крат;
- МИМ 7 - микроскоп исследовательский металлографический.

Стереоскопические микроскопы:

- МБС-1 – микроскоп биологический стереографический;
- МБС-10 - микроскоп биологический стереографический.

Твердомеры:

- твердомер Виккерса, Бринелля, Роквелла;

- микротвердомер ПМТ-3.

Ферритометры:

- объемного типа ФЦ-2;

- локального типа FERRITGEHALTMESSER.

Нагревательные печи:

- камерная печь СНОЛ 1,6.2,0.0,8/9-М1;

- трубчатая печь Т-40/600;

- шахтная печь.

Станки:

- для полировки образцов DAP-V;

- для шлифования LUNN MAJOR.

Металлографическая лаборатория имеет свою фотокомнату, где находятся следующие приборы:

- установка для макросъёмки ФМН-2;

- установка, где используется метод контактной печати ТРВ-1.

В лаборатории применяют химическое и электролитическое травление.

2.2 Задачи и методы исследования макро- и микроструктуры

Макроструктуру металла изучают путём просмотра поверхности специально подготовленных образцов (макрошлифов) или изломов невооруженным глазом при небольших увеличениях – до 30 раз.

Макроанализ даёт общее представление о строении металлов и позволяет оценить его качество после различных операций металлургического производства (выплавка и разливка в слитки и непрерывно-литые заготовки, прокатка, ковка и др.), а также различных видов обработки на машиностроительных предприятиях (литья, обработки давлением, сварки, термической и химико-термической обработки).

Этот анализ позволяет выбрать те участки, которые требуют дальнейшего микроскопического исследования. Широкое применение макроанализа находят при контроле качества сталей и сплавов для обнаружения разнообразных дефектов металлопродукции.

Методы макротравления подразделяют на три основные группы: глубокого травления, поверхностного травления, отпечатков. Структура, выявляемая глубоким травлением, сравнительно слабо зависит от подготовки поверхности образца, в то время как поверхностное травление или метод отпечатков требует более тщательной подготовки поверхности.

Для изучения поверхности нераскрытых изломов образцы, вырезанные в продольном или поперечном направлении (по отношению к течению металла при формоизменении), надрезают с противоположной стороны, а затем разрушают по месту надреза на прессе или копре. Разрушение следует производить с максимальной скоростью и большой сосредоточенной нагрузкой, т. е. в условиях, исключающих смятие поверхности излома и образование ложных расслоений (в поперечных изломах).

Для выявления дефектов, нарушающих сплошность литой или деформированной стали, макрошлифы (темплеты) подвергают глубокому и реже поверхностному травлению. Операцию выполняют в вытяжном шкафу в ванне, изготовленной из материала, не вступающего в реакцию с применяемыми травильными растворами. В некоторых случаях травление осуществляют протиркой тампоном, смоченным в реактиве.

После травления макрошлиф приобретает рельефную поверхность с отчетливо видимыми осями дендритов (литая сталь), ликвационной неоднородностью, пористостью, трещинами и другими дефектами, а также волокнистой структурой (деформированная сталь).

Для определения химической неоднородности стали используют методы поверхностного травления.

Для выявления ликвации фосфора используют реактивы Обергоффера и Стэда.

При травлении реактивом Стэда (5 мл HCl ; 25г CuCl_2 ; 20г MgCl_2 ; 500 мл спирта; 100 мл воды) несколько капель реактива наносят на поверхность шлифа и примерно через 1 минуту сливают. Образование медного слоя на поверхности темплета начинается на свободных от фосфора участках и постепенно распространяется на участки феррита с незначительным содержанием фосфора. В результате длительного травления только участки с высоким содержанием фосфора остаются без медного покрытия.

Для получения отпечатка на распределение серы в металле (по Бауману) темплеты после отжига, строгания или торцевания шлифуют до удаления рисок от предыдущей обработки и полируют пастой зерном 12 и 8. Образцы тщательно протирают от пыли и жировых пятен (для обезжиривания рекомендуется применять денатурированный спирт).

При снятии отпечатков с высокосернистых (автоматных) сталей темплеты предварительно протирают ватным тампоном, смоченным в 5%-ном растворе серной кислоты. При этом удаляют продукты первичной реакции.

Отпечатки снимают на фотобумагу, соответствующую размерам темплета. Листы фотобумаги замачивают в течение 5-8 мин на свету в 5%-ном растворе серной кислоты. От избытка раствора бумагу слегка просушивают фильтровальной бумагой и накладывают эмульсионной стороной на поверхность темплета. С обратной стороны, не допуская сдвига, фотобумагу непрерывно проглаживают резиновым валиком или ватным тампоном до полного удаления пузырьков газа, образующихся при реакции.

Отпечатки снимают при температуре около 20°C до 15 минут в зависимости от легирования стали и содержания в ней серы. Отпечаток считается готовым при потемнении фотобумаги от светло-коричневого (на легированной стали с низким содержанием серы) до темно-коричневого цвета (на углеродистой стали с повышенным содержанием серы, а также фосфора). В местах скопления сернистых включений потемнение фотобумаги будет максимальным в соответствии с количеством образующегося здесь сернистого серебра.

Готовый отпечаток тщательно промывают в проточной воде и обрабатывают фиксажем в течение 20-30 мин (раствор тиосульфата натрия), затем его снова промывают, просушивают и надписывают.

Для снятия повторного отпечатка поверхность образца шлифуют со снятием слоя металла не менее чем на 0,3 мм.

Определение неоднородности в структуре, созданной термической и химико-термической обработкой. Толщину *закаленного слоя* устанавливают по виду излома: он более мелкозернистый, а при закалке без перегрева – фарфоровидный. Чтобы более точно устанавливать толщину этого слоя, образец шлифуют по излому (перпендикулярно оси) и травят в течение 3 мин в 50%-ном растворе соляной кислоты при 80 °С. Закаленный слой приобретает более темную окраску.

2.2.1 Методы исследования микроструктуры

С помощью оптических микроскопов можно изучать структуру специально подготовленных образцов микрошлифа при увеличении до 1500-2000 раз.

Цели микроанализа:

- определение микроструктуры и фазового состава сталей и сплавов, оценка количества, размеров, формы и распределения различных фаз;

- этот анализ позволяет установить связь химического состава, условий производства и обработки сплава с его микроструктурой и свойствами.

Для выявления микроструктуры на подготовленном микрошлифе обычно используют химическое травление:

электролитическое травление;
потенциостатическое травление;
вакуумное травление и другие.

Наиболее часто применяют метод травления в растворах кислот, щелочей и солей, которые вызывают избирательное растворение металлических или других фаз, а также их пограничных участков вследствие различия физико-химических свойств. В результате на поверхности микрошлифа образуется рельеф и при наблюдении под микроскопом более сильно растворившиеся участки из-за тени или более низкого коэффициента отражения (обусловленного растравленной шероховатой поверхностью) представляются более темными, а нерастворившиеся – более светлыми. Для травления по этому способу шлиф погружают полированной поверхностью в соответствующий реактив, состав которого зависит от состава сплава, его обработки и цели исследования; продолжительность травления устанавливается экспериментально.

Электролитическое травление основано на свойствах металла растворяться в разбавленных кислотах. Образец вместе с более благородным металлом включают в гальванический элемент, при этом менее благородный металл переходит в раствор, а на другом полюсе выделяется водород.

2.2.2 Метод фрактографии

Фрактография (fractus-излом) - изучает строение изломов, то есть поверхность образца или детали, образовавшуюся при их разрушении (разделении на части) в результате эксплуатации или испытания.

Исследование закономерностей разрушения с применением методов фрактографии позволяет объединить усилия физики и механики разрушения для создания физической теории разрушения металлических конструкций, отвечающей современным требованиям к конструкционной прочности. На основе полученных зависимостей строят диаграммы механического состояния металла, позволяющие в зависимости от вида напряженного состояния и структуры стали определить возможный характер разрушения, что в итоге повышает надежность работы конструкции в целом.

Фрактография позволяет решать две задачи:

- **идентификацию разновидностей** разрушения с учетом вида нагружения (статическое, повторно-статическое, динамическое, усталостное, кручение). Для этого исследуется макростроение излома, которое отражает характер действующих напряжений, степень перегрузки, расположение и характер очага разрушения, постоянство или изменение кинетики и фронта развития трещины, влияние остаточных напряжений и внешней среды. Расположение очага разрушения позволяет судить о степени влияния конструктивных, технологических и структурных концентраторов напряжений, а также дефектов металла;

- **выявление механизма развития трещины**, глубинные причины воздействия различных факторов, в частности, условий нагружения и свойств материала на процессе разрушения. В этом случае исследуется микро-

строение поверхности излома. Вид излома служит критерием оценки качества металла.

Излом в определенной мере представляет собой своеобразную фотографию тех процессов, которые происходили при разрушении исследуемого объекта.

Наиболее часто для фрактографических исследований металлов и сплавов применяют следующие **методы анализа**:

а) макроскопическую фрактографию – изучение изломов невооруженным глазом или при небольшом (до х50) увеличении;

б) микроскопическую фрактографию - изучение изломов с применением оптических устройств (увеличение до х500);

в) просвечивающую электронную микрофрактографию - изучение изломов с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) методом реплик;

г) растровую электронную микрофрактографию - изучение изломов с помощью сканирующего (РЭМ) электронного микроскопа;

д) рентгеноструктурный и микрорентгеноспектральный (МАР);

е) рентгеноструктурную фрактографию.

Макрофрактография является обязательной начальной стадией любого фрактографического исследования строения изломов и позволяет достаточно надежно определить:

- характер разрушения (хрупкое или вязкое, транс- или интеркристаллитное);

- характер действия нагрузок (статическое или циклическое);

- схему приложения нагрузок (растяжение, сжатие, кручение, изгиб и т. д.);

- некоторые количественные характеристики разрушения, например, степени волокнистого излома, доли прямого излома и хрупкого разрушения.

Макроанализ предусматривает фотографирование изломов с помощью фотоприставок или специальных оптических приборов с компьютерной приставкой.

При изучении характера и причин эксплуатационных разрушений очистка образца проводится только после тщательного осмотра излома в нетронутом виде, т.к. наличие окислов, пыли, следов масла и т.д. может дать дополнительную информацию об условиях возникновения и развития процесса разрушения.

Макроанализ начинают с осмотра поверхности разрушения невооруженным глазом и постепенно переходят к увеличениям 10-50 крат. Определяют участки, необходимые для фотографирования. Важным моментом исследования является правильный выбор угла и интенсивности освещения излома для получения контрастной и объемной картины.

Микрофрактография эффективна при исследовании хрупких и полухрупких изломов с наличием больших гладких фасеток, межзеренных и усталостных изломов. Она позволяет выявить тонкое строение гладких площадок для установления природы разрушения в случае межзеренного излома - изучение строения и состояния межзеренных поверхностей (наличие вторых фаз, прослоек, пленок и т.д.), в случае усталостного излома - оценку строения усталостных бороздок.

Микрофрактография позволяет делать и количественные оценки, например, доли излома, занятого транс- или интеркристаллитными участками при смешанном виде разрушения как соотношение площадей, занятых транскристаллитными фасетками к общей площади излома.

Дополнительную информацию дает проведение микроструктурных исследований материала в зонах, примыкающих к поверхности разрушения.

3 Применение методов анализа для исследования структуры и свойств материала разрушенного изделия

Для выполнения ОДЗ выдана деталь – разрушенный коленчатый вал (рис. 4). Стоит задача в определении причин, которые вызвали его разрушение.

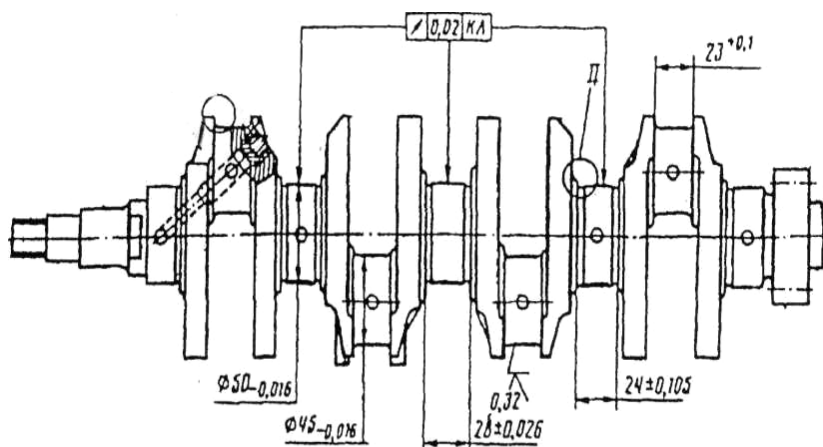


Рисунок 4 - Коленчатый вал грузового автомобиля

Для того чтобы исследовать структуру и свойства материала изделия, коленчатый вал, необходимо применить следующие стадии в проведении анализа:

- вырезка образцов коленчатого вала и подготовка их для исследования - материала в различных лабораториях. Для этого существует механическая мастерская или участок изготовления образцов;

- определить механические свойства на образцах по результатам испытаний на растяжение, на ударную вязкость, измерение твердости;

- определить химический состав на образцах в химической лаборатории, то есть определяется содержание химических элементов;

- проводится последовательное исследование строения поверхности излома коленчатого вала, образовавшуюся при его разрушении в результате эксплуатации.

Приготовленные металлографические шлифы направляются в металлографическую лабораторию. Без травления исследуют неметаллические включения на микрошлифах. Травление применяется для исследования структуры материала.

При необходимости проводится анализ предполагаемой термической обработки. Разрабатываются предложения по изменению микроструктуры изделия с целью улучшения качества применительно к условиям эксплуатации детали.

После каждой стадии анализа необходимо делать соответствующие выводы.

В конце анализа сделать общий вывод по проведенным исследованиям.

3.1 Назначение и условия работы изделия

Валы - детали, предназначенные для передачи крутящего момента вдоль своей оси и для поддержания вращающихся деталей машин.

Валы обычно подвержены действию не только крутящих моментов, но также поперечных сил и изгибающих моментов.

Коленчатые валы - разновидность валов по форме геометрической оси. Коленчатые валы предназначены для преобразования возвратно-поступательного движения

поршня и шатуна во вращательное движение и передачи его на трансмиссию автомобиля. Работоспособность коленчатых валов в основном определяется износостойкостью шатунных и коренных шеек и способностью противостоять усталостным разрушениям при циклических изгибающих нагрузках, максимальное значение которых возникает, как правило, у галтелей в местах сопряжений шеек с шейками.

Коленчатый вал относится к наиболее ответственным деталям автомобильного двигателя и предназначен для превращения механической энергии возвратно-поступательного движения поршневой группы во вращательное движение - крутящий момент. Надежность работы коленчатого вала определяют во многом работоспособность всего двигателя. Работа коленчатого вала протекает в условиях переменных нагрузок, которые передаются от поршня - шатуну - коленчатому валу. Конструктивно коленчатый вал состоит из шатунных шеек и опорных - коренных. Шатунные шейки коленчатого вала в процессе эксплуатации испытывают высокие контактные давления при трении скольжения. При вращении коленчатого вала материал шеек испытывает напряжения изгиба и кручения. Максимальные значения сложного напряженного состояния формируются в начальный период работы или при изменении интенсивности работы двигателя. В этих случаях затруднена подача смазывающих веществ в сопряженные поверхности шатуна и шейки через специальные каналы. При недостаточной работе фильтров в зону трения шатунных и коренных шеек могут попадать посторонние включения, что способствует интенсивности изнашивания поверхности шеек коленчатого вала. Изменение режима работы двигателя способствует динамическому характеру приложения внешней нагрузки.

Коленчатый вал представляет собой конструкцию сложной формы. Для получения коленчатого вала заготовка проходит сложный технологический цикл операций формообразования, термической обработки, черновой и окончательной механической обработки. Каждый из указанных технологических процессов может внести дефекты, снижающие надежность работы коленчатого вала и двигателя в целом. Конструкторские факторы могут проявиться в заниженных размерах галтелей в местах перехода сечений шеек и щек, так как галтели являются концентраторами напряжений; необоснованный выбор материала и назначение технических требований, которые не соответствуют условиям работы двигателя. При формообразовании отливки коленчатого вала несоблюдение режимов заливки чугуна и охлаждения может привести к образованию неоднородной структуры и, как следствие, неодинаковому сопротивлению материала коленчатого вала действующим нагрузкам при работе двигателя. Неблагоприятное влияние оказывают также металлургические дефекты отливки вала.

При термической обработке нарушение назначенного режима может привести к неоднородности структуры, проявляемое в крупнокристаллическом и мелкокристаллическом строении. Крупнокристаллическая структура обладает пониженными характеристиками прочности – повышенная склонность к хрупкому разрушению. Значительную опасность при закалке индукционным нагревом представляют трещины у маслоподводящих отверстий. Они возникают вследствие перегрева кромок из-за повышенной плотности индуктированного тока около отверстий (рис. 5). Поэтому острые кромки отверстий обязательно нужно закруглять или упрочнять поверхностно-пластическим деформированием.

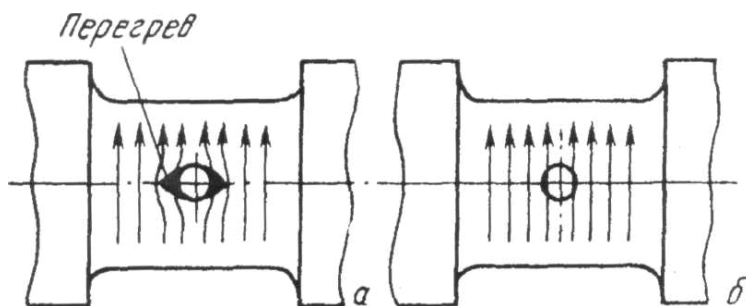


Рисунок 5 - Схема распределения тока в шейке вала при открытом (а) отверстии и с применением заглушки (б)

Существенное значение на уровень надежности работы коленчатого вала оказывает неуравновешенность, которая может возникнуть не только из-за неправильной механической обработки, но и неоднородности материала или другим причинам. Неуравновешенность коленчатого вала вызывает вибрации, нарушающие правильную работу двигателя вследствие появления центробежных сил инерции. Динамическая неуравновешенность приводит к неравномерному воздействию внешних сил и увеличению опорных реакций при вращении вала, что отрицательно проявляется на сопротивлении материала вала усталости. Важное значение имеют шероховатость поверхности и возможность образования шлифовочных трещин, которые снижают надежность работы коленчатого вала.

Распределение закаленного слоя ТВЧ в районе шеек коленчатого вала (рис. 6) приводит к различной величине напряжений возле галтелей, являющимися концентраторами напряжений. Это приводит к различному сопротивлению действующим нагрузкам изгиба, особенно если длина закаленного слоя неравномерна по длине шейки.

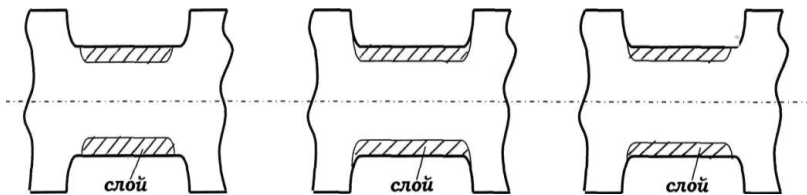


Рисунок 6 - Схема расположения закаленного слоя по шейке коленчатого вала

Выбор материала и термической обработки валов определяется критериями их работоспособности, в том числе критериями работоспособности цапф с опорами. Заготовки валов, при их изготовлении из сталей, получают горячей штамповкой с обеспечением благоприятного расположения волоком. Получается хорошая макроструктура - волокна металла не перерезаются, а соответствуют конфигурации вала (рис. 7).

После штамповки заготовки для улучшения обрабатываемости резанием и подготовки структуры к последующей термической обработке подвергают нормализации. Твердость сталей после нормализации HB 170 - 220. Контроль структуры и свойств осуществляют на темплетях (образцах), которые отрезают от поковок.

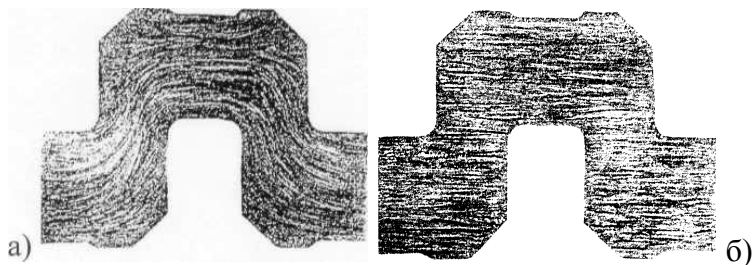


Рисунок 7 - Схема макроструктуры коленчатого вала:
а - штампованного; б - вырезанного из заготовки

Основными материалами для валов служат углеродистые и легированные стали благодаря высоким механическим характеристикам, способности к упрочнению и легкости получения цилиндрических заготовок прокаткой.

Для большинства валов применяют термически обрабатываемые среднеуглеродистые и легированные стали 45, 40Х. Для высоконапряженных валов ответственных машин применяют легированные стали: 40ХН, 40ХН2МА, 30ХГТ, 30ХГСА и др. Валы из этих сталей обычно подвергают улучшению (закалке с высоким отпуском) или поверхностной закалке с нагревом ТВЧ и низким отпуском.

Для изготовления фасонных валов - коленчатых, с большими фланцами и отверстиями, и тяжелых валов наряду со сталью применяют высокопрочные чугуны (с шаровидным графитом) и модифицированные чугуны. Меньшая прочность чугунных валов в значительной степени компенсируется более совершенными формами валов (особенно коленчатых), меньшей чувствительностью в многоопорных валах к смещению опор (благодаря меньшему модулю упругости) и меньшей динамической нагрузкой ввиду повышенной демпфирующей способности.

В качестве заготовок для стальных валов диаметром до 150 мм обычно используют круглый прокат, для валов большего диаметра и фасонных валов - поковки.

Валы подвергают токарной обработке и последующему шлифованию посадочных поверхностей. Высоконапряженные валы шлифуют по всей поверхности. Шероховатость поверхности под подшипники качения в зависимости от класса точности подшипников и диаметра назначают от $Ra = 0,16-0,32$ мкм под высокопрецизионные подшипники до $Ra = 1,5-2,5$ мкм под подшипники класса точности 0, а под подшипники скольжения в зависимости от условий работы $Ra = 1-0,16$ мкм.

Торцы валов для облегчения насадки деталей, во избежание обмятий и повреждения рук рабочих выполняют с фасками.

3.2 Исследовательская часть

3.2.1 Анализ химического состава

В результате химического анализа образцов, вырезанных из разрушенного коленчатого вала, был получен следующий химический состав: $C = 0,48\%$, $Si = 0,29\%$, $Mn = 0,76\%$, $S = 0,022\%$, $P = 0,017\%$.

Как видно, эти данные показывают, что для изготовления коленчатого вала использовалась конструкционная углеродистая сталь - сталь 45.

Такой вывод мы сделали, сравнив химический состав, полученный для нашей детали с гарантированным составом для стали 45 по ГОСТу 1050-74, согласно которого состав стали 45 следующий:

$C = 0,42 - 0,50 \%$; $Si = 0,17 - 0,37 \%$; $Mn = 0,5 - 0,8\%$;
не более $S = 0,04 \%$, $P = 0,035\%$.

Таким образом, наш коленчатый вал был изготовлен из стали 45 и никаких нарушений в химическом составе не обнаружено.

3.2.2 Анализ механических свойств

В результате механических испытаний образцов, вырезанных из разрушенного коленчатого вала, были получены следующие данные механических свойств: $\sigma_{0,2} = 350 \text{ МПа}$; $\sigma_b = 660 \text{ МПа}$; $\delta = 26 \%$; $\psi = 49 \%$; $KCU = 4,5 \text{ кгс.м/см}^2$.

Эти данные характеризуют следующий вид термической обработки для стали 45 - нормализацию.

Такой вывод мы сделали, сравнив механические свойства, полученные после нормализации для стали 45 для нашей детали при исследованиях с гарантиро-

ванными механическими свойствами для стали 45 по ГОСТу 1050-74.

Согласно ГОСТа 1050-74 механические свойства после нормализации для стали 45 следующие:

$$\sigma_{0.2} = 360 \text{ МПа};$$

$$\sigma_B = 610 \text{ МПа};$$

$$\delta = 16\%;$$

$$\psi = 40\%;$$

$$KCU = 5 \text{ кгс.м/см}^2.$$

Согласно ГОСТа 1050-74 механические свойства после термоулучшения для стали 45 следующие:

$$\sigma_{0.2} = 530 \text{ МПа};$$

$$\sigma_B = 780 \text{ МПа};$$

$$\delta = 35\%;$$

$$\psi = 54\%.$$

Сравнив значения полученных механических свойств со справочными, мы установили, что режим термической обработки был упрощен: термоулучшение заменили нормализацией. Таким образом, наш коленчатый вал был подвергнут нормализации.

3.2.3 Анализ макроструктуры материала

3.2.3.1 Фрактографические исследования

При рассмотрении излома разрушенного коленчатого вала мы установили следующие закономерности: по характеру силового воздействия: усталостный излом; по микромеханизмам разрушения: квазискोल; по степени деформации: квазихрупкий излом. Усталостный излом имеет следующие зоны (рис. 8):

- 1 - очаг разрушения;
- 2 - ступеньки сброса;
- 3 - усталостные линии;
- 4 - язычки;
- 5- зона долома.

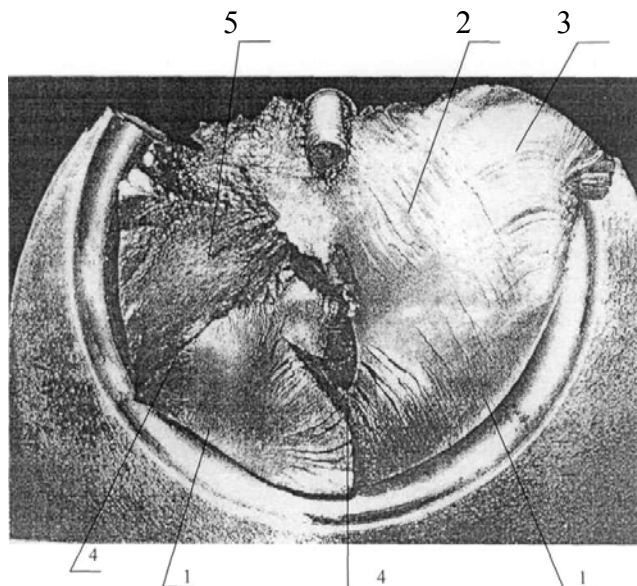


Рисунок 8 – Фактограмма излома коленчатого вала

Особенность микрорельефа усталостного излома: наличие «траковых» следов или усталостных бороздок, которые представляют собой систему повторяющихся углублений и выступов, ориентированных перпендикулярно к направлению развития трещины и являются следом ее перемещения за каждый цикл нагружения.

Ступеньки сброса образуются в результате объединения между собой развивающихся вглубь от магистральной трещины так называемых вторичных трещин. Ступеньки сброса указывают направление развития разрушения.

По мере развития и роста магистральной трещины уменьшается живое сечение материала изделия и возрастает скорость разрушения, формируя переходной участок перед конечным разрушением - зоны долома, которая образуется за один или несколько циклов.

3.2.3.2. *Определение химической неоднородности стали*

Выявление ликвации серы и фосфора производим на образце стали 45.

Для определения ликвации серы используем метод серного отпечатка (по Бауману). Для снятия отпечатка на распределение серы в макрошлифе шлифуем его до удаления рисок от предыдущей обработки и полируем зерном 12 и 8 по ГОСТу 6456-82. Образец тщательно протираем от пыли и жировых пятен (для обезжиривания рекомендуется применять денатурированный спирт).

Макрошлиф протираем ватным тампоном, смоченным в спирте. При этом удаляем продукты первичной реакции. Укладываем образец шлифованной поверхностью вверх на столе.

Отпечаток снимаем на фотобумагу. Лист глянцевой бромосеребряной фотографической бумаги вымачиваем на свету в 5 %-ном водном растворе серной кислоты в течение 5-10 минут. От избытка раствора бумагу слегка просушиваем фильтровальной бумагой и накладываем эмульсионной стороной на поверхность макрошлифа. С обратной стороны, не допуская сдвига, фотобумагу непрерывно проглаживают резиновым валиком или ватным тампоном до полного удаления пузырьков газа, образующихся при реакции. Выдерживаем в течение 2-3 минут. Потом осторожно снимаем с макрошлифа фотобумагу.

Готовый отпечаток тщательно промываем в воде и обрабатываем фиксажем (в 25% водном растворе гипосульфита), затем его снова промываем в воде, просушиваем. В результате исследования на фотобумаге мы получили участки коричневого цвета, которые указывают на неравномерность распределение серы по объему образца.

Выявление ликвации фосфора. Для снятия отпечатка о распределении фосфора в макрошлифе, шлифуем его до удаления рисок от предыдущей обработки и полируем зерном 12 и 8 по ГОСТу 6456-82. Образец тщательно протираем от пыли и жировых пятен (для обезжиривания рекомендуется применять денатурированный спирт).

Макрошлиф протираем ватным тампоном, смоченным в спирте. При этом удаляем продукты первичной реакции. Укладываем образец шлифованной поверхностью вверх на столе. Образец погружаем в реактив:

85 г хлорной меди, 53 г хлористого аммония в 1000 см³ воды. Выдерживаем в нем в течение 1-2 минуты. После выдержки образец извлекаем из реактива. Вся поверхность образца покрыта у нас медью (красного цвета).

Смываем струей воды с поверхности макрошлифа слой меди и протираем ватой, смоченной в спирте. Просушиваем образец, прикладывая к поверхности макрошлифа фильтровальную бумагу, остальную поверхность обтираем тряпкой. В результате исследования на макрошлифе мы получили более темные участки и более светлые. Это указывает на наличие ликвации фосфора.

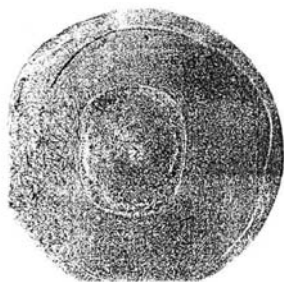


Рисунок 9 – Ликвационный квадрат в структуре металла после прокатки

Более темные участки - это более протравившиеся участки, обогащенные фосфором, так как чем больше фосфора в железе, тем быстрее оно растворяется.

Более светлые участки - это участки с меньшим содержанием фосфора. Неравномерность распределения серы и фосфора часто проявляется в наличии так называемого ликвационного квадрата (рис. 9).

3.3.4 Анализ микроструктуры материала

Как отмечалось ранее, коленчатый вал был подвергнут термической обработке, а именно нормализации. Для определения возможных нарушений термической обработки стали 45 коленчатого вала были проведены испытания.

С этой целью мы использовали четыре образца, вырезанные из коленчатого вала. Данные образцы были пронумерованы от 0 до 3. Один образец был оставлен для определения твердости и микроструктуры исходного материала коленчатого вала (стали 45), а три остальных подвергались различным видам термической обработки, а именно:

- 0 - исходный образец;
- 1 - образец после отжига;
- 2 - образец после нормализации;
- 3 - образец после термоулучшения.

На образцах мы измерили твердость на приборе Роквелла. Измеряли твердость с боковой стороны образцов. Для этой цели приготовили лыски. Значения твердости были следующие:

- а - исходный образец: HRC21;
- б - образец после отжига: HRC19;
- в - образец после нормализации: HRC23;
- г - образец после термоулучшения: HRC30.

Далее эти образцы мы подготовили к исследованию микроструктуры. Образцы вначале были отшлифованы, отполированы, а потом были протравлены.

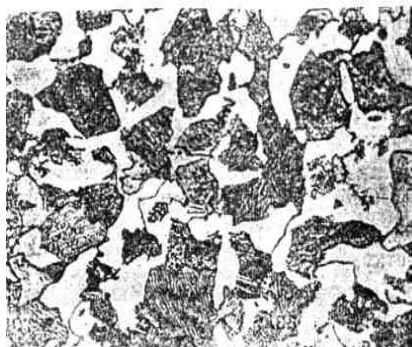
Следующий этап - фотографирование микроструктуры образцов на микроскопе НЕОФНОТ 21 при увеличении 200 крат. Мы получили фотографии с различными структурами (рис. 10).

Из фотографий микроструктур четырех образцов можно сделать вывод о том, что структура исходного образца больше всего похожа на структуру образца после нормализации. В результате получилась пластинчатая структура

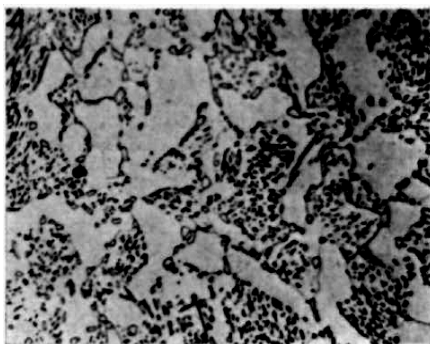
перлита. Это подтверждает наше предположение о том, что произошла на предприятии замена термической обработки: вместо термоулучшения была использована нормализация как более дешевый вид термообработки. Это и могло привести к разрушению коленчатого вала.



а - образец после отжига



б – образец после нормализации



в - образец после термоулучшения

Рисунок 10 - Микроструктуры образцов после различных видов термической обработки (x500)

3.3.5 Выводы по проведенному исследованию разрушения коленчатого вала

Марка стали для изготовления коленчатого вала была выбрана согласно чертежа.

Термообработка была выполнена с нарушением режима: термоулучшение заменено нормализацией. В результате получилась пластинчатая структура перлита, ко-

торая и способствовала разрушению коленчатого вала, т.к. обладает меньшим значением пределом усталости. Поверхностного упрочнения материала вала не установлено.

3.3.6. Предложения по устранению данного дефекта

Необходимо провести термоулучшение для получения более мелкозернистой структуры - сорбит.

Закалка с высоким отпуском (по сравнению с нормализацией и отжигом) одновременно повышает временное сопротивление, предел текучести, относительное сужение и особенно ударную вязкость. Термическую обработку, состоящую из закалки и высокого отпуска, называют термоулучшением.

Термоулучшению подвергаем среднеуглеродистую (0,45%С) конструкционную сталь, к которой предъявляются высокие требования по пределу выносливости и ударной вязкости. Термоулучшение значительно повышает конструктивную прочность стали, уменьшая чувствительность к концентраторам напряжений, увеличивая работу развития трещин и снижая температуру порога хладноломкости. Однако износостойкость улучшенной стали вследствие ее пониженной твердости невысокая.

Проводим полную закалку, то есть нагрев стали выше A_{c3} : при температуре 850°C, выдержкой и последующим быстрым охлаждением со скоростью 300-1000°C в секунду в воде.

Высокий отпуск проводим при 550-600°C в течение 1-2 часа с охлаждением на воздухе. Он почти полностью снимает остаточные напряжения, возникшие при закалке, создает наилучшее соотношение прочности и вязкости стали. Длительность высокого отпуска составляет 1,0-6 часов в зависимости от габаритов изделия. Структура стали после высокого отпуска - сорбит отпуска.

Для увеличения долговечности коленчатого вала необходимо упрочнять галтельные переходы шеек, это повысит усталостную прочность.

Выводы

При выполнении курсовой работы приобрели навыки самостоятельного решения инженерных задач с применением методов анализа и контроля стали при исследовании причин разрушения коленчатого вала.

При исследовании разрушения коленчатого вала было установлено, что:

- во-первых, марка стали для изготовления коленчатого вала была выбрана правильно;
- во-вторых, термообработка была выполнена с нарушением режима: термоулучшение заменено нормализацией. В результате получилась пластинчатая структура перлита, которая и способствовала разрушению коленчатого вала.

Для устранения такого дефекта необходимо провести термоулучшение для получения более мелкозернистой структуры - сорбит. Для повышения долговечности коленчатого вала необходимо упрочнять галтельные переходы шеек. Это повысит усталостную прочность, так как все очаги находятся непосредственно в области галтелей.

Целесообразно провести закалку ТВЧ шеек коленчатого вала в местах перехода галтелей с глубиной упрочнения поверхности 3 -5 мм.

Список литературы

1. Методические указания к практической работе «Исследования поверхности изломов» по курсу «Методы анализа и контроля металлов и сплавов» /Составители: О.А.Пчелиниев; В.Н.Раб. –Сумы: Изд-во СумГУ, 2000.

2. Изломы конструкционных сталей: Справочник. /Герасимова Л.П., Ечков А.Н., Маресев М.И. – М.: Металлургия, 1987. 272 с.

Список литературы

1. Решетов Д. Н. «Детали машин»: Учебник для студентов машиностроительных вузов и механических специальностей вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.: ил.
2. Беляев Г. С., Табачников П. И. «Технология производства валов»: - М.: Машиностроение, 1961. – 250 с.
3. Костецкий Б. И. «Износостойкость металлов». – М.: Машиностроение, 1980, 52с.
4. Часовников Л. Д. Передачи зацеплением (зубчатые и червячные). Изд. 2-е переработанное и дополненное. М., «Машиностроение», 1969. 486 стр.
5. Якушев А.И., Воронцов Л.Н., Федотов Н.М. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
6. Иванов М. Н., Детали машин. Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1976 – 339
7. Учаев П. Н. “Прикладная механика ДМ и основы конструирования, конспект лекций”, ч. I-VI, 1996 г.
8. Н. Г. Куклин, Г. С. Куклина, “Детали машин”, Москва, Высшая школа, 1987 г.

Навчальне видання

**Пчелінцев Віктор Олександрович,
Раб Валентина Миколаївна**

**ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ОСНОВНИХ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Навчально-методичний посібник
(Російською мовою)

Дизайн обкладинки В.О.Пчелінцева
Редактор Н.А.Гавриленко
Комп'ютерне верстання В.Д.Вінницької, С.І.Жижі

Підп. до друку 22.05.2008.
Формат 60x84/16. Папір офс. Гарнітура Times New Roman Суг. Друк офс.
Ум. друк. арк. 8,14. Обл-вид. арк. 5,9.
Тираж 100 пр.
Зам. №

Видавництво СумДУ при Сумському державному університеті
40007, м. Суми, вул. Р.-Корсакова,2
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного
реєстру ДК № 3062 від 17.12.2007.
Надруковано у друкарні СумДУ. 40007, Суми, вул. Р.-Корсакова, 2.