

РАЗРУШЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

1. Общие сведения о долговечности и надежности машин

Терминология в области надежности в СССР стандартизирована. Общесоюзный стандарт (ГОСТ 13377—75) содержит 24 основных термина, определения и показателя надежности, которые можно разделить на три группы: общие понятия, свойства и показатели. Пять терминов: работоспособность, отказ, неисправность, наработка и резервирование являются общими понятиями. К свойствам также относится пять терминов: надежность, долговечность, безотказность, ремонтпригодность и сохраняемость. Остальные 14 терминов, приведенных в ГОСТ 13377—75, — гамма-процентный ресурс, наработка на отказ, средняя наработка до первого отказа, среднее время восстановления, коэффициент готовности, коэффициент технологического использования, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, параметр потока отказов, ресурс, назначенный ресурс, срок службы, срок гарантии и гарантийная наработка — являются показателями. Приведем определения некоторых терминов, установленные стандартом.

Нарботка — продолжительность или объем работы изделия в течение рассматриваемого периода, измеряемая в часах, километрах, циклах и других единицах измерения.

Надежность — способность изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки.

Работоспособность — состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями нормативно-технической документации.

Отказ — полная или частичная утрата изделием работоспособности.

Неисправность — состояние изделия, при котором оно в данный момент времени не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической документации.

Долговечность — свойство изделия длительно сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов.

Безотказность — свойство изделия сохранять работоспособность в течение не-

которой наработки без вынужденных перерывов.

Ремонтпригодность — свойство изделия, заключающееся в его приспособленности к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Сохраняемость — свойство изделия непрерывно сохранять обусловленные эксплуатационные показатели в течение и после срока хранения и транспортирования, установленного в нормативно-технической документации.

Срок службы — календарная продолжительность эксплуатации изделия от определенного момента времени до наступления предельного состояния, оговоренного в нормативно-технической документации, или до списания. При этом предельное состояние изделия может устанавливаться по изменению параметров, по условиям безопасности, по экономическим показателям и т. п. Различают срок службы до первого капитального или среднего ремонта, срок службы между капитальными или средними ремонтами, срок службы до списания, средний срок службы и др.

Ресурс — наработка изделия от определенного момента времени до наступления предельного состояния, оговоренного в нормативно-технической документации.

Гамма-процентный ресурс — ресурс, который имеет и превышает в среднем обусловленное число (γ) процентов изделий данного типа.

Назначенный ресурс — наработка изделия, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от состояния изделия.

Гарантийная наработка — наработка изделия, до завершения которой изготовитель гарантирует и обеспечивает сохранение определенных свойств изделия при условии соблюдения потребителем правил эксплуатации, в том числе правил хранения и транспортирования.

Нарботка на отказ — среднее значение наработки ремонтируемого изделия между отказами.

Коэффициент технического использования — отношение наработки изделия в единицах времени за некоторый период эксплуатации к сумме средних значений наработки и времени всех простоев, вызванных техническим обслуживанием и ремонтами за тот же период эксплуатации.

Коэффициент готовности — вероятность того, что изделие будет рабо-

тоспособно в произвольно выбранный момент времени в промежутках между выполнениями планового технического обслуживания.

2. Способы определения долговечности

Долговечность машины, ее отдельных узлов или деталей определяется на основании лабораторных, стендовых, полигонных или эксплуатационных испытаний.

При лабораторных испытаниях лишь в определенной мере имитируются эксплуатационные условия взаимодействия отдельных деталей. Для ускорения испытаний влияние главных факторов, определяющих долговечность детали, обычно усиливается. В качестве показателей долговечности при лабораторных испытаниях используются относительные срок службы, износостойкость, усталостная прочность и др. Зная срок службы стандартной детали и относительную эффективность ее упрочнения по новому методу, установленную при лабораторных испытаниях, можно приближенно определить срок службы упрочненной детали. Полученные при этом данные могут быть использованы для расчета экономической эффективности предлагаемых технологических мероприятий на проектной стадии.

Для получения более точных сведений о долговечности узлов или отдельных ответственных деталей машин проводят стендовые испытания. В этом случае детали или узлы обычно соответствуют чертежам проекта машины и испытываются в одном, а иногда и в нескольких эксплуатационных режимах. В качестве контрольных показателей долговечности используется число часов работы, число циклов нагружения при данном режиме испытаний, число включений и выключений определенного механизма, число торможений и т. д.

Для оценки фактической долговечности машины или ее отдельных узлов проводят испытания машины в условиях эксплуатации. В методике испытаний предусматривают соблюдение соответствующих режимов работы машины, обеспечивающих нормальную эксплуатационную нагрузку. Показателем долговечности машины при эксплуатационных испытаниях является длительность работы до разрушения, выраженная, например, в часах, в числе циклов эксплуатационного нагружения определенной интенсивности, в кубических метрах выбранного грунта и др.

В процессе разработки конструкции машины, станка, агрегата закладываются основы долговечности и надежности отдельных узлов и деталей. При изготовлении машины большое влияние на качество и долговечность деталей оказывают различные технологические факторы. От правильности выбора метода изготовления, назначения соответствующей упрочняющей обработки металла, качества сборки во многом зависят надежность и долговечность наиболее нагруженных сопряженных деталей,

рабочих органов машины. И, наконец, большое влияние оказывают условия эксплуатации машины, субъективные особенности обслуживающего персонала. Таким образом, при создании машины и последующей ее эксплуатации используются различные методы увеличения срока службы ее деталей и узлов. Эти методы можно разделить на три основные группы: конструктивные, технологические и эксплуатационные.

Конструктивные методы повышения долговечности деталей машин включают комплекс мероприятий, связанных с созданием рациональной конструкции машины. Среди них наиболее существенными являются правильный выбор конструктивного решения, от которого зависит работоспособность сопряженных деталей при эксплуатации, экономичность и эффективность агрегата, а также правильный выбор конструктором материалов и обеспечение равнопрочности деталей и узлов. Практика показывает, что неудачную конструкцию можно значительно улучшить путем правильного подбора материалов для ее деталей; но нельзя успешно эксплуатировать машины, если материал деталей и его свойства выбраны неверно. Чтобы обеспечить длительную эксплуатацию узлов машины, конструктор должен предусмотреть простоту их обслуживания и ремонта.

К технологическим методам повышения долговечности деталей машин относятся мероприятия по улучшению свойств материалов, применяемых в данной конструкции. Свойства детали начинают формироваться в процессе литья, сварки, обработки давлением и механической обработки. При выполнении этих операций закладываются прочностные характеристики и другие показатели долговечности будущих деталей машины. Все последующие операции изготовления детали сводятся к улучшению свойств материала заготовки. Поэтому прежде чем назначать улучшающую обработку, следует убедиться в правильности выбора материала и метода получения заготовки детали. Особенно велико влияние способа получения заготовки на ударную вязкость материала. Так, диапазон колебаний величины ударной вязкости стали Ст3 после литья и проковки находится в пределах 2—20 кгс·м/см². Еще значительно можно изменить свойства деталей, применив новые методы получения заготовок и новые материалы типа металлокерамики, пластических масс или композиционных веществ.

Дальнейшее повышение долговечности деталей машин при их изготовлении осуществляется путем применения различных методов термической и химико-термической обработки, а также покрытий. Эти виды обработки позволяют значительно повысить прочность и износостойкость деталей. Предел выносливости можно увеличить за счет применения поверхностного наклепа. Эффект упрочнения в этом случае достигается за счет изменения тонкой кристаллической структуры и создания в поверхностных слоях детали сжимающих напряжений, снижения вредного влияния

концентраторов напряжений. В качестве мероприятий, повышающих коррозионную стойкость деталей, широко используются методы нанесения гальванических, лакокрасочных, пластмассовых и других покрытий. В табл. 1.1 приведены сведения о характере работы и основных видах повреждений широко распространенных деталей машин, а также о материалах и способах повышения долговечности.

Изготовленная машина поступает в эксплуатацию. Ресурс ее в зависимости от условий эксплуатации существенно изменяется. При неудовлетворительном уходе отмечаются случаи выхода из строя новых машин в самом начале эксплуатации. Поэтому эксплуатационные мероприятия являются составной частью комплекса мероприятий по увеличению долговечности машин. К ним в первую очередь относятся организационно-технические мероприятия, способствующие реализации установленных графиков планово-предупредительного ремонта, систематический контроль за износом сопряженных деталей. Большое влияние на интенсивность износа ответственных деталей машины оказывает качество ухода за машиной, особенно своевременная смазка трущихся частей, предохранение их от загрязнения. Весьма эффективным методом увеличения срока службы агрегата или машины является применение наиболее рациональных режимов эксплуатации, исключающих чрезмерную перегрузку двигателя и рабочих элементов машины.

Для предупреждения поломки деталей оборудования в механизмы встраивают предохранительные устройства, представляющие собой детали, устанавливаемые в кинематической цепи, прочность которых ниже прочности остальных деталей. При перегрузках эти детали ломаются первыми, в результате чего механизм выключается. К числу таких деталей относятся предохранительные стаканы, устанавливаемые под нажимными винтами, срезные муфты, срезные шпиндели и др.

3. Классификация видов разрушения деталей машин

Наблюдения за износом и повреждениями деталей машин при эксплуатации позволяют выделить пять основных видов разрушения деталей: 1) деформация и изломы (хрупкий излом, вязкий излом, усталостный излом, остаточная деформация, контактные усталостные повреждения); 2) механический износ (истирание металлических пар, абразивный износ, питтингование); 3) эрозивно-кавитационные повреждения (жидкостная эрозия, кавитация, газовая эрозия); 4) коррозионные повреждения (атмосферная коррозия, коррозия в электролитах, газовая коррозия); 5) коррозионно-механические повреждения (коррозионная усталость, коррозионное растрескивание, коррозия при трении). Характерные виды разрушения деталей машин приведены в табл. 1.2.

Долговечность деталей машин определяется главным образом их прочностью, жест-

костью и износостойкостью. При проектировании наиболее полно удается решить вопросы обеспечения прочности деталей. Для тех случаев, когда в процессе эксплуатации могут возникнуть не поддающиеся точному расчету перегрузки отдельных деталей или узлов, необходимо либо найти способ автоматического выключения этих деталей, либо предусмотреть предохранительные средства, исключающие возможность поломок основных дорогостоящих частей данного механизма. Более сложно обеспечить высокую износостойкость деталей, определяющую в основном их долговечность. Для этого необходимо предусмотреть достаточную жесткость базисных деталей: станин, корпусов, коробок, ферм и др. Кроме того, следует обеспечить строгое соблюдение правил технической эксплуатации и технологическую дисциплину. Необходимо своевременно компенсировать износ трущихся поверхностей и производить требуемую регулировку деталей машин и механизмов. В системе планово-предупредительных ремонтов следует предусмотреть мероприятия, способствующие предупреждению неисправностей в работе оборудования и созданию условий, при которых износ трущихся деталей был бы минимальным. В то же время основным мероприятием, обеспечивающим необходимые эксплуатационные свойства и в первую очередь износостойкость деталей машин, является выбор оптимальных материалов и соответствующих методов упрочняющей обработки.

4. Изнашивание деталей машин

Основные термины и определения, принятые при анализе процессов трения и изнашивания, регламентированы ГОСТ 23.002—78 и ГОСТ 23.001—78. Испытания на изнашивание проводят в соответствии с ГОСТ 23.203—78, ГОСТ 23.204—78, ГОСТ 23.205—79, ГОСТ 23.209—79, ГОСТ 23.208—79 и др.

Процесс изнашивания деталей машин характеризуется тремя периодами (рис. 1.1):

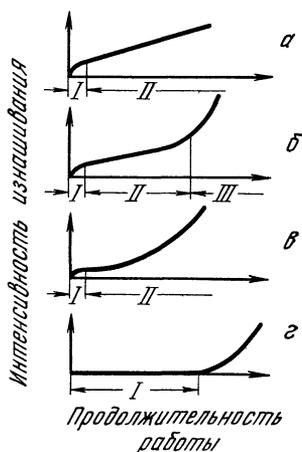


Рис. 1.1. Типовые кривые интенсивности изнашивания деталей

Таблица 1.1

Условия эксплуатации и способы повышения долговечности некоторых деталей машин

Наименование деталей	Нагрузки, действующие на деталь в процессе эксплуатации	Материалы, применяемые для изготовления деталей	Основные виды повреждений при эксплуатации	Способы повышения долговечности
1	2	3	4	5
Болты и шпильки резьбовых соединений	Статические напряжения от предварительной затяжки и переменные напряжения от изменяющихся нагрузок	Стали марок 10, 15, 20, 35, 40, 45, 35X, 40X, 45X и др.	Усталостные изломы, деформация	Повышение прочности стали, уменьшение концентрации напряжений, повышение класса шероховатости поверхности резьбы болта, обкатка резьбы болта роликами
Колеса зубчатых передач	Изгиб зубьев, контактное сжатие и сдвиг рабочих поверхностей зубьев, трение и удары торцов зубьев при изменении частоты вращения	Стали марок 35, 40, 45, 50, 35X, 40X, 45X, 40ХН, 45ХН, 38ХГН, 30ХГТ, 12ХНЗА, 40ХНМА, 38Х2МЮА (для тяжело нагруженных передач) Пластмассы (капрон или текстолит) или древеснослоистые пластики (для малонагруженных передач)	Излом зуба (усталостный или из-за перегрузки), выкрашивание, изнашивание, деформация или заедание зубьев	Корректирование, улучшение, поверхностная закалка зубьев, цементация, азотирование, нитроцементация рабочих поверхностей зубьев
Червяки и червячные колеса червячных передач	Трение витков червяка о рабочую поверхность зубьев червячного колеса, изгиб зубьев червячного колеса	Червяки — конструкционные стали; червячные колеса — бронзы марок Бр0Ф10-1, Бр0НФ, БрАЖ9-4; серые чугуны марок СЧ 15-32, СЧ 21-40 и др.	Заедание, изнашивание рабочих поверхностей, пластическая деформация и излом зубьев червячного колеса	Корректирование зубьев червячного колеса, повышение класса шероховатости, закалка или цементация рабочих поверхностей витков червяка
Звездочки цепных передач	Удары и трение рабочих поверхностей звездочек об элементы цепи	Конструкционные стали, серый чугун СЧ 15-32	Изнашивание рабочих поверхностей зубьев	Проектирование звездочек с вогнутым профилем зубьев, повышение класса шероховатости, закалка или цементация зубьев
Валы и оси	Изгиб и кручение, трение скольжения между цапфой и опорой	Конструкционные стали марок 40, 45, 40X, 45X, 38ХГН, 40ХН, 45ХН, 37ХНЗА и др.	Усталостные поломки, изнашивание и задиры цапф, заедание	Уменьшение влияния концентраторов напряжений (увеличение радиуса галтелей и др.), шлифование цапф, улучшение, поверхностная закалка, поверхностный наклеп галтелей

Опоры скольжения (подшипники и подпятники)	Трение скольжения между опорой и цапфой	Антифрикционные материалы: сплавы на основе олова, свинца, меди, алюминия, цинка; чугуны; металлокерамика	Изнашивание, заедание, усталостное разрушение поверхности трения	Обеспечение условий жидкостного трения, увеличение жесткости опоры, высокая точность изготовления цапфы, нанесение покрытий для улучшения приработки
Подшипники качения	Трение тел качения о наружные и внутренние кольца	Для тел качения и подшипниковых колец: ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ, 9Х18, 15Х, 18ХГТ, 20Х2Н4А; для сепараторов: низкоуглеродистые и нержавеющие стали, бронзы, латуни, алюминиевые сплавы	Излом кольца, разрушение тел качения, изнашивание тел качения и колец, усталостное выкрашивание, заедание	Обеспечение податливости корпуса в нагруженной части подшипника
Гильзы цилиндров поршневых двигателей внутреннего сгорания	Механические нагрузки от изменения давления газов, тепловое и коррозионное воздействие газов и охлаждающей жидкости, трение о поршневые кольца и поршень	Серые чугуны с перлитной основой, модифицированные и легированные чугуны, азотируемая сталь 38Х2МЮА	Изнашивание внутренней поверхности, появление рисок, задиров, овальность, трещины, коррозия, кавитационное разрушение	Закалка и отпуск, азотирование, покрытие внутренней поверхности пористым хромом
Лопастные рабочие колеса гидротурбин	Кавитационное и коррозионное действие среды, изгиб, действие пульсирующего потока, вызывающего вибрацию	Стали марок 25Х14НЛ и 20Х13НЛ; облицовка деталей листами из стали 12Х18Н10Т (приваркой)	Кавитационное разрушение поверхности	Применение материалов или облицовок, стойких против кавитационного разрушения
Пальцы звеньев гусениц трактора	Сухое трение при высоких удельных нагрузках, динамических воздействиях и наличии абразива и влаги	Стали марок 50, 50Г, 50Г2 или 27СГ	Изнашивание участков, трущихся о проушины (или втулки) звеньев гусениц	Закалка поверхности при нагреве токами высокой частоты, борирование
Втулки звеньев гусениц трактора	То же	Цементуемые стали марок 15Х и 20Х	Изнашивание участков, трущихся о палец	Цементация с последующей закалкой и низким отпуском
Опорные катки гусеничных тракторов	Контактные давления и ударные нагрузки, трение качения с проскальзыванием, попадание абразива и влаги в места контакта трущихся пар	Стали марок 50, 45Л, 45ГЛ, 38ХС и др.	Изнашивание беговой дорожки и боковых поверхностей	Поверхностная закалка беговой дорожки и боковых поверхностей при нагреве токами высокой частоты; наплавка

Таблица 12

Характерные виды разрушения деталей машин

Вид разрушения	Наименование деталей	Характер повреждения	Причины разрушения
1	2	3	4
Остаточная деформация	Бандажи, крановые колеса, рельсы, натяженные болты, сосуды, подшипники качения	Изменение геометрической формы детали (удлинение, изгиб, вмятины и т.д.)	Длительное действие переменных контактных, растягивающих или сжимающих напряжений, повышение температуры металла
Вязкий излом	Связи и анкерные болты, несущие элементы ферм и других пространственных конструкций, натяженные болты	Разрушение, сопровождающееся значительной деформацией. Поверхность излома матовая, имеются сколы, строчечные неровности, волокнистость	Значительные перегрузки вследствие нарушения нормальных условий эксплуатации
Хрупкий излом	Сварные соединения, фасонные детали, болты, а также валики и пальцы, имеющие высокую твердость, чугуны, отливки	Разрушение при незначительной деформации. Поверхность излома имеет кристаллическое строение, часто с рубцами, лучеобразно расходящимися из зоны начала разрушения	Наличие ударных нагрузок, дефекты термической обработки, низкое качество металла, повышенное содержание фосфора и водорода, наличие концентраторов напряжений (трещин), хладноломкость стали
Усталостный излом	Валы, оси, шатуны, болты, сварные соединения, подвергающиеся длительному действию знакопеременных нагрузок	Образование трещин или разрушение. Поверхность излома имеет зоны постепенного развития, ускоренного развития трещины и зону долома	Пониженная прочность материала, действие знакопеременной нагрузки, циклических температурных напряжений, наличие концентраторов напряжений (надрезы, неметаллические включения, микротрещины)
Истирание металлических пар	Подшипники скольжения, валы, оси, направляющие, крейцкопфы, кулисы, цепные передачи, поршневые кольца, втулки и др.	Постепенное изменение геометрических размеров детали	Длительное трение сопряженных поверхностей
Усталостное выкрашивание	Зубчатые передачи, подшипники качения, бандажи, крановые колеса, рельсы	Возникновение на контактных поверхностях мелких осповидных выщербин	Пониженная контактная прочность материала, высокие контактные напряжения
Абразивный износ	Детали гусениц тракторов, формовочных машин и пескометов, открытые передачи, зубья ковшей экскаваторов, детали машин, подвергающиеся истиранию	Постепенное изменение размеров. На поверхности трения наблюдаются риски, направление которых соответствует направлению движения абразивных частиц	Взаимодействие трущихся поверхностей с абразивными частицами

Заедание	Шестерни зубчатых передач, подшипники качения	Адгезия и вырывание частиц металла из контактирующих поверхностей	Пониженная вязкость масла или выдавливание масляной пленки при высоких скоростях и больших давлениях
Ползучесть	Лопатки, диски паровых и газовых турбин, трубы паропроводов, пароперегреватели котлов	Медленная и непрерывная пластическая деформация	Нагрев выше температуры рекристаллизации, напряжения в материале выше предела упругости при данной температуре
Газовая эрозия	Конусы и чаша загрузочного устройства доменных печей, направляющие и рабочие лопатки газотурбинных установок, кипящие трубы паровых котлов, лопатки дымососов	Истирание поверхности твердыми частицами газового потока. Образование рисков, расположенных вдоль газового потока, волн, направленных перпендикулярно движению потока, и др.	Недостаточное сопротивление материала действию среды и пластическое деформирование поверхностных слоев
Кавитация	Гребные винты, детали гидротурбин, детали машин, подвергающиеся водяному охлаждению, трубопроводы	Появление на поверхности металла глубоких питтингов, которые сливаются и образуют сквозное отверстие	Воздействие жидкости при высоких скоростях движения детали
Атмосферная коррозия	Кабины и кузовы, детали машин, подвергающихся действию атмосферных осадков и влажного воздуха	Образование рыхлых пленок окислов железа с последующим шелушением и возникновением очагов точечной коррозии	Неудовлетворительное нанесение защитных покрытий, плохой уход за машиной
Коррозия в электролитах	Котельные установки, сосуды химической водоочистки, подводные части морских судов	Коррозионные питтинги, рассеянные по всей поверхности деталей, местная коррозия вблизи соединений листов и рамных конструкций	Развитие электрохимических процессов в результате неоднородности материала при наличии свободного доступа кислорода
Газовая коррозия	Детали котельных топков газовых турбин, клапаны двигателей внутреннего сгорания, электрические нагревательные элементы, детали термических печей	Образование на поверхности детали плотного хрупкого слоя окислов	Высокая температура нагрева и низкая окислительность материала
Коррозионная усталость	Оси и штоки насосов, гребные валы, металлосвязные канаты, рессоры и другие детали, испытывающие знакопеременные нагрузки в коррозионной среде	Коррозионно-усталостный излом, поверхность которого покрыта слоем продуктов коррозии	Совместное действие переменных напряжений и коррозионно-активной среды
Коррозионное растрескивание	Напряженные детали котлов, находящиеся под действием щелочных растворов; сосуды из нержавеющей стали; детали, изготовленные из латуни и дуралюмина	Появление сетки трещин по границам зерен с резким снижением прочности материала	Избирательное коррозионное разрушение границ зерен или одного из компонентов сплава под влиянием коррозионной среды и механических напряжений
Коррозия при трении (фреттинг-коррозия)	Болтовые и заклепочные соединения, подшипники качения, шестерни, муфты, детали, находящиеся в подвижном контакте	Возникновение на контактных поверхностях коррозионных повреждений в виде отдельных пятен или полос небольшой глубины	Непрерывное разрушение защитной окисной пленки в точках подвижного контакта

начальным или приработкой (I), установившимся (II) и усиленного износа (аварийным) (III). При определенных условиях изнашивания может отсутствовать какой-либо из периодов.

В период приработки интенсивность изнашивания деталей обычно велика, что объясняется небольшой фактической площадью соприкосновения деталей, имеющих поверхности со значительными макро- и микронеровностями, а следовательно, изнашивание происходит при высоких удельных усилиях. В результате приработки изменяются микро- и макрогеометрия поверхностей, увеличивается площадь фактического контакта и уменьшаются удельные усилия в точках контакта, что приводит к уменьшению интенсивности изнашивания. Одновременно может происходить и изменение микро-структуры поверхностных слоев металла. Длительность приработки определяется как условиями нагружения, так и состоянием поверхностных слоев деталей.

В период приработки детали должны работать при пониженных режимах, так как значительный нагрев на участках фактического контакта может привести к схватыванию, заеданию и оплавлению частиц металла. Большое значение имеет точность изготовления и сборки деталей, а также физические, химические и механические свойства поверхностных слоев, от которых зависят пластичность и прирабатываемость поверхности, адсорбция смазки, образование пленок вторичных структур и оптимального микрорельефа.

В некоторых случаях при изнашивании деталей резко ухудшаются условия их работы — нарушается режим смазки, возникают дополнительные динамические нагрузки и т. п. При этом резко возрастает интенсивность изнашивания. Период, в котором наблюдается такое возрастание интенсивности изнашивания, называется периодом аварийного износа. Работа деталей в условиях аварийного износа, как правило, не допускается.

Различают четыре типовые кривые изменения интенсивности изнашивания (см. рис. I.1). Кривая, приведенная на рис. I.1, а, соответствует случаю, когда в процессе изнашивания внешние условия не изменяются или их изменение не сказывается на интенсивности изнашивания. Износ в соответствии с кривой, показанной на рис. I.1, б, обычно наблюдается на деталях, трущихся поверхностях которых подвергались цементации, закалке с нагревом токами высокой частоты и другим видам поверхностной обработки. После износа таких слоев наступает период аварийного износа. Кривая, приведенная на рис. I.1, в, соответствует случаю, когда с самого начала работы интенсивность изнашивания возрастает вследствие увеличения динамических нагрузок, утечки смазки, попадания в зазор абразивных частиц. Кривая, показанная на рис. I.1, г, характерна для деталей, у которых интенсивность изнашивания в начальный период работы весьма незначительна. Только после достижения определенного числа циклов нагруже-

ния наблюдается усталостное разрушение поверхностных слоев металла.

Для увеличения сроков службы деталей следует сокращать период приработки, максимально увеличивать период установившегося изнашивания и предупреждать период усиленного изнашивания.

Износостойкость деталей определяется совокупностью внутренних и внешних факторов, к числу которых относят: физические, химические и механические свойства трущихся поверхностей; род и характер трения; величину удельного усилия, действующего между трущимися поверхностями, и характер приложения нагрузки; скорость взаимного перемещения трущихся поверхностей и режимы изменения скорости во времени; способ подвода, количество и качество смазки (вязкость, абсорбционная способность и характер изменения этих свойств при разных температурах, давлениях и т. д.); температурные условия; корродирующее воздействие среды и качество образующихся поверхностных пленок; присутствие абразивов, их качественную и размерную характеристики; степень и способ удаления продуктов износа; форму и размеры трущихся поверхностей, определяющие условия трения, охлаждения, подвода смазки; начальное состояние поверхности и т. д.

Многочисленные исследования показали, что из всех перечисленных факторов основное влияние на износостойкость металлов, сплавов и наплавленного металла оказывает их структура, определяющая сопротивление продвижению дислокаций под действием внешних сил. Остальные факторы либо способствуют образованию определенной структуры (химический состав, термическая обработка), либо сами зависят от нее (механические свойства). Остаточные напряжения и наклеп также непосредственно связаны со структурой.

Наиболее распространенным является абразивный износ, под которым обычно понимают разрушение поверхности деталей машин при трении скольжения, обусловленное наличием в зоне трения абразивной среды минерального происхождения.

Трение металлической детали может происходить о твердое тело, однородное по составу (например, руда) или представляющее собой массу твердых частиц, образующих монолитное тело, в которое включены минеральные вкрапления. В этих случаях изнашивающие металл твердые частицы не будут перемещаться друг относительно друга, вдавливаясь в основу или перекатываясь; они будут оставлять на металле след в виде выдавленной или вырезанной царапины. Такие случаи абразивного износа наблюдаются при трении металлов о руду, о содержащий породу уголь; в частности, такому изнашиванию подвергаются зубья ковшей экскаваторов и драг, решетки скребковых конвейеров, броневые плиты тракта перемещения материалов в доменных и агломерационных цехах, приемной воронки распределителя шихты загрузочного устройства доменных печей, скипов и т. д. Во всех случаях изнашивающее воздействие производят минералы, твердость кото-

Таблица 1.3

Относительная износостойкость различных материалов*

Материал	Микротвердость H_{80}	Относительная износостойкость ε	Материал	Микротвердость H_{80}	Относительная износостойкость ε
Железо			белый	364	44,0
Армко	140	19,4	Твердые сплавы:		
Стали:			сормайт № 1	869	54,7
Ст3	150	20,7	(литой)		
40	163	22,4	ВК6	1960	80,2
40	460	29,8	ВК8	1510	70,6
40	560	32,8	ВК15	1110	61,8
У8	186	25,6	карбид воль-		
У8	822	44,4	фрама (литой)		
У12	210	28,8	состава:		
У12	364	34,1	эвтектическо-	2520	330,7
У12	645	44,0	го		
У12	940	50,8	дозвтектиче-	2290	157,2
Х12	218	30,1	ского		
Х12	550	45,1	заэвтектиче-	2405	206,9
Х12	840	58,6	ского		
Р18	800	62,0			
Чугуны:					
СПЧ-11-55а	228	28,0			
СПЧ-11-55а	585	42,0			

* Относительная износостойкость ε — это износостойкость материала, отнесенная к износостойкости оловянносвинцового сплава БМ, принятой за единицу. При этом износостойкость эталона (сталь 40 без термической обработки) составляет 22,4.

рых больше, чем твердость металла. В аналогичных условиях работает, например, шейка вала, когда сопряженная деталь из более мягкого металла (подшипник) оказывается шаржированной (хотя бы временно)

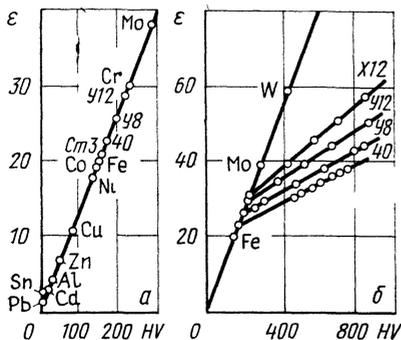


Рис. 1.2. Зависимость относительной износостойкости ε от твердости технически чистых металлов и углеродистых сталей:

а — в отожженном состоянии; б — после закалки и отпуска

твердыми абразивными частицами. Таким же образом при трении твердой и очень шероховатой шейки вала о подшипник происходит изнашивание баббита. К этому виду износа по характеру происходящего разрушения металла можно отнести шлифование абразивной шкуркой, наждачным бруском, наждачным кругом, а также обработку напильником.

Твердые абразивные частицы не всегда образуют монолитное тело, а могут пред-

ставлять собой непрочную связанную массу. При трении металла об эту массу отдельные твердые частицы перемещаются относительно друг друга. Усилие, с которым такая частица будет вдавливаться в металл, определяется прочностью общей массы и размером частиц. В зависимости от этих условий на металле могут образовываться царапины или же будет происходить полирование поверхности; в последнем случае изнашивание при трении будет подвергаться только тонкий поверхностный слой, образующийся в результате взаимодействия металла с кислородом воздуха или иной средой, в которой происходит обработка.

При высокой твердости абразивных частиц износостойкость пропорциональна твердости металла (рис. 1.2 и табл. 1.3).

Основная линия, исходящая из начала координат, относится к чистым металлам и отожженным сталям; дополнительные — к термически упрочненным сталям. Из рис. 1.2 видно, что износостойкость закаленных сталей при равной твердости ниже, чем износостойкость сплавов со стабильной структурой, причем чем больше в стали углерода, тем выше ее сопротивление изнашиванию в рассматриваемых условиях при данной твердости. Это связано с тем, что у сплавов со стабильной структурой при одинаковой твердости со сплавами с метастабильной структурой сопротивление многократному деформированию поверхностей трения более высокое.

На рис. 1.3 приведена диаграмма, отражающая качественную связь между относительной износостойкостью и структурой углеродистых сплавов. Линия 1—4 характеризует изменение относительной износостой-

кости при увеличении содержания углерода в сплаве (от 0 до 6,67%), т. е. при переходе от чистого железа к цементиту (эта линия соответствует изменению износостойкости чистых металлов и сталей в отожженном состоянии). На отрезке 1—2 располагаются значения относительной износостойкости для отожженных доэвтектоидных сталей, на отрезке 2—3 — для заэвтектоидных, а на отрезке 3—4 — для белых чугунов. Точки

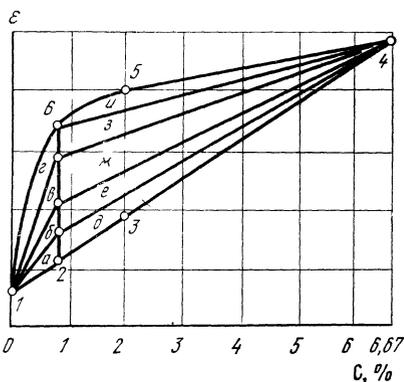


Рис. 1.3. Зависимость относительной износостойкости ϵ от микроструктуры железоуглеродистых сплавов:

a — феррит+перлит; *б* — феррит+сорбит; *в* — феррит+троостит; *г* — феррит+мартенсит; *д* — перлит+цементит; *е* — сорбит+цементит; *ж* — троостит+цементит; *з* — мартенсит+цементит; *и* — мартенсит

1, 2 и 4 характеризуют соответственно относительную износостойкость феррита, перлита и цементита. Линия 2—6 отвечает изменению износостойкости эвтектоидной стали в зависимости от степени дисперсности частиц цементита.

В зависимости от условий взаимодействия детали с абразивными частицами разрушение металла может происходить в результате микрорезания, многократного пластического деформирования поверхности трения и коррозионно-механического изнашивания. Установлено, что механизм абразивного изнашивания определяется главным образом соотношением значений твердости материала H_m и твердости абразивных частиц H_a ($K_T = H_m/H_a$). Микрорезание и интенсивное пластическое деформирование поверхностей трения могут наблюдаться при $H_m \ll H_a$. При более высокой твердости сплава процесс разрушения протекает в основном за счет коррозионно-механического изнашивания или хрупкого выкрашивания.

При малых значениях K_T ($< 0,6$) интенсивность изнашивания велика. Увеличение K_T до значений, превышающих 0,6, приводит к интенсивному росту износостойкости деталей.

На рис. 1.4 приведена диаграмма зависимости износостойкости от твердости для конструкционных сталей разных марок, подвергнутых термической и химико-термической обработкам, составленная М. М. Тененбаумом при испытании этих сталей на

карбундовой и песчаной шкурках. Область 1 относится к низкоуглеродистым сталям (Ст3, 20, 20ХН, 12ХН3А и др.). Так как максимальная твердость этих сталей, достигаемая при закалке, на 60% ниже твердости абразива, рассматриваемая зависимость имеет линейный характер. Влияния различия в степени легированности этих сталей опытом не отмечается. Область 2 отражает изменение износостойкости среднеуглеродистых сталей (50Г, 65Г, 45Г2, 40Х, 40ХН и др.). К высокоуглеродистым сталям (У12А, ШХ15, ШХ15СГ и др.) относится область 3; выше расположены области

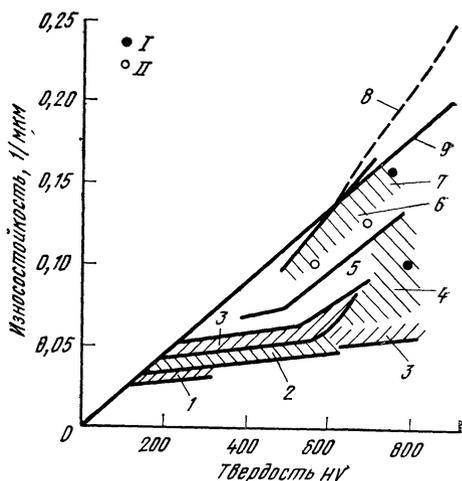


Рис. 1.4. Зависимость износостойкости от твердости сталей, подвергнутых термической и химико-термической обработкам:

I — азотированные; II — нитроцементованные образцы

для цементированных 4, нитроцементированных 5, цементированных высокоуглеродистых 6 и азотированных 7 сталей. Основная прямая 9, отражающая изменение износостойкости чистых металлов и отожженных сталей (при испытании на карбундовой шкурке), в области высоких значений твердости (при испытании на песчаной шкурке) отклоняется вверх (кривая 8).

Схемы разрушения поверхностей трения представлены на рис. 15 При движении абразивной массы по поверхности изделия происходит непрерывное деформирование основы сплава вместе с мелкими карбидами, рассеянными по всему объему. Эти деформационные процессы определяют интенсивность изнашивания изделия при условии, что твердость металла $H_m < 0,8H_a$. При этом, чем выше твердость и ниже пластичность матрицы, тем больше сопротивление сплава истиранию в абразивной среде. При взаимодействии твердых структурных составляющих с «мягким» абразивным материалом процесс изнашивания может протекать вследствие истирания окисной пленки, непрерывно восстанавливающейся в атмосферных условиях, или вследствие выкрашивания структурных элементов сплава при наличии динамических нагрузок.

Зависимость износостойкости от твердости материала имеет линейный характер только при микрорезании и пластическом отгеснении. При увеличении твердости сплава более $0,8H_a$ наблюдается нелинейная зависимость $\varepsilon = bH^n$, где b — коэффициент пропорциональности, зависящий от условий изнашивания; H — твердость материала; n — показатель степени, при $H_M < 0,6H_a$ его

твердых тел, и их разрушение; молекулярное схватывание поверхностей, сопровождающееся глубинным вырыванием материала (сварка в узлах схватывания).

С увеличением давления на трущиеся поверхности интенсивность изнашивания в большинстве случаев возрастает плавно, без резких скачков (рис. 1.6). Лишь при очень высоком давлении в результате ин-

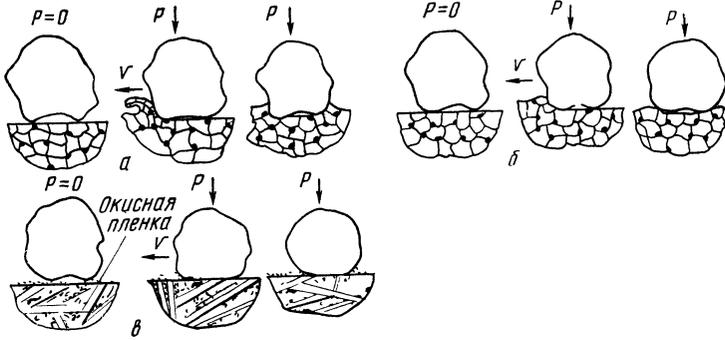


Рис. 1.5. Схема разрушения поверхностей трения абразивными частицами (по В. Н. Ткачеву):

а — микрорезание ($H_M < H_a$); б — пластическое отгеснение ($H_M \leq 0,6H_a$); в — коррозионно-механический износ ($H_M > 0,8H_a$)

величина равна единице, по мере роста твердости абсолютное значение n увеличивается.

Наличие нелинейной зависимости между износостойкостью и твердостью объясняется тем, что по мере увеличения твердости сплава способность абразивных частиц деформировать поверхность утрачивается и процессы пластической деформации уступают место коррозионно-механическим явлениям. Если нагрузки имеют динамический характер, в формулу необходимо ввести дополнительный поправочный коэффициент, учитывающий характер их приложения.

При относительном движении сочлененных деталей машин между контактирующими поверхностями возникает трение. Поэтому детали машин подвергаются изнашиванию, интенсивность которого зависит от условий взаимодействия трущихся пар. Трение металлических пар может быть жидкостным, при неполной (несовершенной) смазке и твердым (сухим). Наибольший износ отмечается при сухом трении. Согласно концепции И. В. Крагельского, сухое трение имеет двойственную молекулярно-механическую природу. При взаимодействии неровностей характер разрушения металла в пятнах касания зависит от глубины внедрения, геометрических параметров внедрившихся элементов и соотношения их механических свойств, а также от сил адгезии, проявляющихся при молекулярном контакте.

В зависимости от условий взаимодействия неровностей наблюдаются следующие явления: срез внедрившегося материала (микрорезание); пластическое отгеснение металла; упругое отгеснение металла; схватывание пленок, покрывающих поверхность

тенсивной деформации микронеровностей на поверхности трения возможно появление грубых рисок и адгезионного схватывания металла.

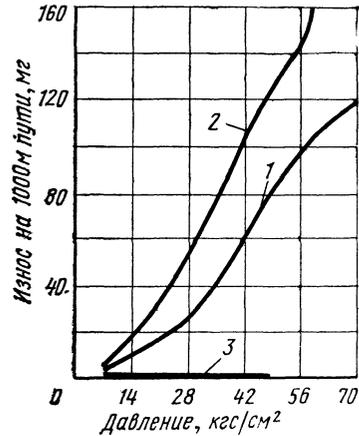


Рис. 1.6. Зависимость износа термически обработанной стали У10А от давления при скорости скольжения, м/с:

1 — 3,11; 2 — 4,6; 3 — 0,49

Влияние скорости скольжения на интенсивность изнашивания показано на рис. 1.7. Разные участки кривой соответствуют различным видам износа. Точки 1—11 характеризуют качественные изменения в поверхностных слоях металла в зависимости от скорости скольжения.

Помимо указанных факторов, существенное влияние на взаимодействие трущихся

металлических поверхностей при сухом трении оказывают качество поверхности, температура металла в зоне трения, структура и свойства материалов трущихся пар и др.

Влияние содержания углерода и условий термической обработки на твердость и износостойкость углеродистой стали при сухом трении показано на рис. 1.8. Легирование стали марганцем повышает износостойкость, однако в закаленном состоянии и после низкого отпуска влияние марганца

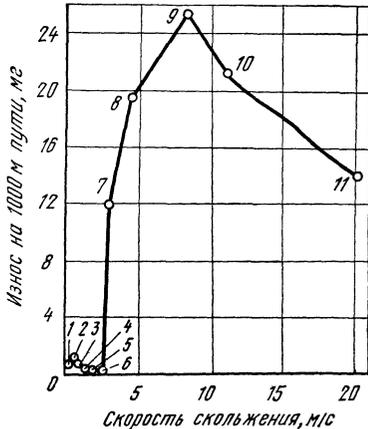


Рис. 1.7. Зависимость износа термически обработанной стали У10А при давлении 14 кг/см² от скорости скольжения, м/с:

1 — 0,28; 2 — 0,49; 3 — 0,98; 4 — 1,44; 5 — 1,78; 6 — 2,59; 7 — 3,11; 8 — 4,6; 9 — 8,63; 10 — 11,5; 11 — 20,7

невелико. При повышении температуры отпуска износостойкость марганцовистых сталей снижается, но по сравнению с углеродистой сталью характеризуется значительно большей величиной. Хром также повышает износостойкость стали. Его введение в марганцовистую сталь (38ХГН) устраняет отрицательное влияние никеля на износостойкость. Однако при отсутствии марганца износостойкость хромоникелевой стали (40ХН) невелика. Введение значительных количеств никеля приводит к резкому снижению износостойкости. Так, износостойкость хромоникелевой стали, содержащей 4% Ni, оказывается ниже, чем углеродистой. Высокая износостойкость стали достигается при совместном легировании ее хромом, кремнием и вольфрамом. Более других повышает износостойкость стали кремний.

Действие легирующих элементов наиболее сильно проявляется в средне- и высокоотпущенной стали. В мартенситном состоянии влияние легирующих элементов сказывается значительно слабее, что связано с их воздействием на микроструктуру стали.

Одним из видов абразивного износа является абразивная эрозия. Возможны следующие виды перемещения абразивных частиц, при котором возникает абразивная эрозия:

а) в виде струи (износ некоторых типов броневых плит по тракту перемещения шихтовых материалов, деталей загрузочно-

го устройства доменных печей, деталей дробилок, сопел пескоструйных установок и др.);

б) в газовом потоке (износ большого и малого конусов загрузочного устройства, деталей газоотводов и пылеуловителей доменных печей, труб и других деталей различных пневматических установок и др.);

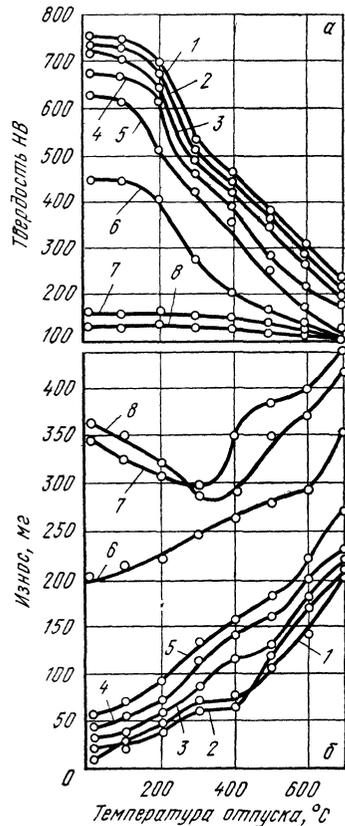


Рис. 1.8. Влияние температуры отпуска на твердость (а) и износ (б) закаленных углеродистых сталей:

1 — У12А; 2 — У10А; 3 — У8А; 4 — У7А; 5 — 45; 6 — 35; 7 — 15; 8 — 08

в) в потоке жидкости (износ глассажных труб нагревательных печей, многих типов водоохлаждаемых деталей, лопастей роторов гидравлических установок, лопастей насосов и др.).

Таким образом, абразивная эрозия представляет собой процесс разрушения поверхности материала под действием мелких частиц, находящихся во взвешенном состоянии в струе газа или жидкости. Мелкие частицы абразива, имеющие острые углы, с силой ударяются о поверхность металла, вызывая износ. Царапины, образующиеся при абразивном воздействии, являются концентраторами напряжений, способствуя усталостному разрушению металла.

Одновременно поверхность металла разрушается вследствие образования микро- и макротрещин, возникающих под действием

термических напряжений. При ударах абразивных частиц в поверхностных слоях наблюдается интенсивная пластическая деформация микронеровностей; более 50% внешней энергии при этом переходит в тепло. При многократных воздействиях абразивные частицы создают на поверхности детали тепловую знакопеременную нагрузку, приводящую к образованию усталостных трещин.

На процесс абразивной эрозии влияют и другие факторы — полное давление газов, вызывающее расклинивающее действие; химическая активность газовой струи и абразивных зерен; первоначальное состояние поверхности, подвергающейся эрозионному воздействию, и др.

Разрушение поверхности может произойти и при отсутствии абразивных частиц в результате обтекания изделий потоком жидкости или газа. Ударяясь о поверхность металла, такие потоки разрушают поверхностный слой, что приводит к появлению каверн, бороздок и др. Разновидностями эрозионного износа в этом случае являются газовая и кавитационная эрозия.

В основе явления газовой эрозии лежит удар газовых молекул о поверхность металла и разрушение кристаллитов поверхностного слоя. Скорость износа при газовой эрозии может быть значительной, если поток газов обладает большой кинетической энергией и создает высокие напряжения в поверхностном слое материала. При воздействии потока горячих газов эрозионное разрушение происходит значительно быстрее. Одним из факторов, стимулирующих изнашивание материала при эрозии, является удаление отлагающихся на поверхности продуктов коррозии. Исходя из этого, износостойкость определяется скоростью образования и удаления продуктов взаимодействия материала со средой и их свойствами. При отсутствии абразивных частиц в газовом потоке твердость самого материала не характеризует его износостойкость при эрозионном износе и не может, естественно, использоваться как показатель износостойкости.

В слое жидкости, прилегающем к металлу, при определенных условиях обтекания возникают области пониженного при данной температуре давления, где зарождаются кавитационные (парогазовые) пузырьки. В момент завершения кавитации (при замыкании пузырьков) металл испытывает гидравлические удары.

Многократные гидравлические удары, частота которых измеряется сотнями герц, сильно локализованы и вызывают возникновение больших напряжений в поверхностном слое деталей. Одновременно на поверхность действует жидкость, ослабляющая сопротивление материала циклическому контактному воздействию, а при высокой температуре вызывающая также образование продуктов коррозии, обычно непрочных и хрупких. Указанные явления могут вызвать хрупкое или усталостное разрушение изделий.

Эффективным способом борьбы с кавитационным износом является усовершенство-

вание конструкции, исключающее возможность образования кавитационного эффекта. Важное значение имеет и подбор износостойких материалов для рассматриваемых условий изнашивания.

Скорость кавитационного износа в тысячи раз выше скорости чисто коррозионного разрушения — поверхностного слоя. Двойственная природа этого процесса определяет отсутствие прямой зависимости между стойкостью материалов в условиях кавитации и их механическими свойствами. Если предположить, что для какой-то группы сталей действие коррозионных факторов равнозначно, то с повышением твердости и содержания углерода износостойкость возрастает. Легирование сталей хромом и никелем, приводящее к повышению коррозионной стойкости, также благоприятно сказывается на сопротивлении материалов кавитационному изнашиванию. Опыт показывает, что оценка кавитационной стойкости материалов по показателям твердости не дает точных результатов и оправдывается лишь практическими удобствами. Здесь стойкость определяется сочетанием механических и антикоррозионных свойств. Поэтому правильной кавитационную стойкость оценивать по сопротивлению хрупкому разрушению при одновременном действии агрессивной среды.

Твердые частицы могут находиться между двумя металлическими поверхностями, имеющими относительное перемещение под нагрузкой. В этом случае передвижение абразивной частицы по поверхности каждой из деталей зависит от соотношения твердости этих деталей. При большой разности в твердостях абразивная частица может глубоко вдавливаясь в более мягкую поверхность (шаржировать ее) и, двигаясь вместе с ней и став ее закрепленной частицей, будет изнашивать более твердую деталь. Через эти частицы будет передаваться нагрузка, что при недостаточной прочности частиц может привести к их дроблению. Абразивное действие частиц, попавших между двумя металлическими поверхностями, приводит к выходу из строя большого числа деталей металлургических машин.

Абразивному изнашиванию подвергаются детали дробилок, перерабатывающих руду в агломерационных цехах и на обогатительных фабриках. Условия трения и взаимодействия деталей и дробимого материала весьма различны в разных машинах в связи с влиянием дополнительных факторов; например, в щековых, конических и валковых дробилках на рабочие детали действуют высокие контактные сосредоточенные нагрузки; в дезинтеграторах и других ударных дробилках контактные нагрузки носят ударный характер; для вибрационных дробилок характерны малые, но частые перемещения металлических мелющих тел относительно перерабатываемого материала.

Трение руды и других материалов о металлические детали может сопровождаться нагревом разной степени, поэтому сопротивление металла изнашиванию определяется не исходными его свойствами, а свойствами, присущими металлу в данном со-

стоянии. Нагрев при трении может быть весьма высоким, что доказывается обнаружением на поверхности трения стальных деталей участков белой фазы — признака местной закалки, возникшей вследствие мгновенного местного нагрева до температуры, превышающей верхнюю критическую точку. Например, участки местной вторичной закалки наблюдали на рабочей поверхности роликов правильных машин, что указывает на высокий местный нагрев, вызванный теплом, выделенным при трении ролика о металл в процессе правки.

При абразивном изнашивании происходит наклеп поверхностного слоя металла. При интенсивном пластическом деформировании под действием ударной нагрузки у некоторых сталей наблюдаются упрочнение и повышение износостойкости. Примером могут служить многие детали металлургического оборудования, изготовленные из высокомарганцевистой стали марки 110Г13Л: защитные сегменты малого конуса загрузочного устройства доменной печи, броневые плиты приемных воронок, воронок распределителя шихты, газоотводов, пылеуловителей, скипов, трактов перемещения материалов в доменных и агломерационных цехах, дробилок и др.

Во многих случаях повышение температуры трущихся поверхностей происходит не только в результате трения, а вызывается условиями работы данных деталей и узлов: воздействием потоков горячего газа и воздуха, влиянием горячего агломерата, действием соприкасающегося с деталями нагретого до высоких температур металла и др. В этих случаях абразивное воздействие неметаллических частиц усугубляется изменением свойств материала, газовой коррозией и другими факторами, осложняющими и стимулирующими процесс изнашивания деталей.

5. Коррозионные повреждения деталей машин

Коррозия металлов и сплавов — это процесс их разрушения вследствие химического или электрохимического воздействия окружающей среды. Основные особенности коррозионных повреждений: разрушение металла всегда начинается с поверхности; внешний вид детали, как правило, изменяется; в результате коррозии металл обычно превращается в оксиды или гидроксиды.

По характеру внешней среды коррозию делят на три основных вида: атмосферную, газовую и коррозию в электролитах.

Электрохимическая коррозия объясняется действием микрোগальванических элементов. В качестве анода и катода могут служить различные структурные составляющие сплава, границы и сердцевина зерна, напряженный и ненапряженный участки металла, чистый металл и его оксиды. Гидратированные ионы взаимодействуют с водой, в результате чего образуются оксиды металла, которые обычно оседают на поверхности изделий, образуя плотную или рыхлую пленку из продуктов коррозии. Интенсивность процесса электрохимической

коррозии зависит от химического состава сплава; электропроводности раствора, обусловленной содержанием солей и кислот; характера и плотности продуктов коррозии; наличия и распределения напряжений и др.

Коррозия металлов в электролитах — это частный случай электрохимической коррозии, вызванной непрерывным воздействием на металл воды, содержащей значительное количество солей, кислот и щелочей. Наиболее характерным примером коррозии этого вида является разрушение внутренних поверхностей металлических котлов.

Атмосферная коррозия развивается при нормальном давлении и температуре, не превышающей 80° С. Детали машин в этом случае находятся в контакте с атмосферным воздухом, который всегда содержит некоторое количество влаги. Мельчайшие частицы влаги, являющейся электролитом (в связи с наличием в ней солей, щелочей и кислот), оседают на поверхности металла, что создает необходимые условия для образования микрোগальванических элементов (микропар).

Газовая коррозия является частным случаем химической коррозии. Внешней средой являются газ, горячий воздух или пар. Коррозия этого вида поражает самые различные детали машин и оборудование, работающее при повышенных температурах в контакте с агрессивными газами. Наиболее распространенным случаем газовой коррозии является коррозия, возникшая в результате взаимодействия кислорода воздуха с металлом. На поверхности металла образуется слой оксидов (окалина), который становится хорошо заметным при температурах более 300° С. При нагреве углеродистой стали выше 570° С интенсивность окисления скачкообразно увеличивается. Пленка окислов имеет сложное строение, обусловленное встречной диффузией кислорода и атомов железа. Вначале располагается слой вюстита FeO, затем следует слой вюстита и магнетита Fe₃O₄, за ним слой магнетита и на самой поверхности пленки окислов располагается слой гематита Fe₂O₃. Наибольшей сплошностью обладает слой вюстита. Слои магнетита и гематита покрыты густой сеткой трещин и пор. Этим обуславливается низкое сопротивление углеродистой стали окислению.

Хром, алюминий и кремний при взаимодействии с кислородом образуют плотные и прочные пленки окислов, поэтому легирование стали этими элементами приводит к существенному повышению ее коррозионной стойкости при высоких температурах. Так, например, при содержании 12% Cr сталь весьма устойчива к окислению при температуре 800° С, а при содержании 22% Cr — при температуре 900—1000° С.

Основными факторами, влияющими на интенсивность разрушения от коррозии, являются состав сплава, состав и температура газовой атмосферы; наличие на поверхности защитных покрытий. Поэтому при невозможности уменьшить агрессивные свойства газовой среды следует применять соответствующие марки легированных сталей или защитные покрытия.

6. Контактная и коррозионная усталость

Проявлением контактной усталости является усталостное выкрашивание. Этот вид разрушения деталей машин чаще всего наблюдается при трении качения и качении со скольжением, однако может проявляться и при других условиях взаимодействия трущихся пар, например при скольжении, многократном соударении двух тел. Причиной образования повреждений (питтингов) является пульсационное действие контактных напряжений, возникающих в результате переменного давления на трущиеся поверхности.

Нормальные напряжения, возникающие на контактной площадке, имеют максимальное значение на поверхности и уменьшаются в глубь детали. Касательные напряжения достигают максимального значения на некоторой глубине от поверхности. Силы трения, возникающие на контактирующих поверхностях, значительно увеличивают величину касательных напряжений, которые являются основной причиной зарождения усталостных трещин. Развитие усталостных трещин совпадает с направлением действия касательных напряжений.

При осуществлении поверхностного упрочнения толщина упрочненного слоя должна быть больше глубины распространения максимальных касательных напряжений, а материал основы должен обладать достаточной твердостью, предупреждающей продавливание упрочненного слоя под действием контактных давлений. В противном случае возникает опасность отслаивания и растрескивания упрочненного слоя.

Поскольку возникновение питтингов обусловлено действием циклических контактных напряжений, следует стремиться к уменьшению удельных нагрузок в контакте и повышению предела прочности материала детали.

Коррозионная усталость — это процесс разрушения металлов и сплавов при одновременном действии коррозионной среды и циклических напряжений. Коррозионное воздействие значительно усиливает развитие «повреждений» в структуре металла, возникающих в «слабых» зернах в результате микропластической деформации. Вследствие коррозии на поверхности детали может возникнуть микроскопический питтинг, который явится концентратором напряжения и послужит причиной образования сетки микротрещин. Процесс развития трещин коррозионной усталости протекает более интенсивно, так как дно и стенки трещины подвергаются воздействию коррозионной среды, что увеличивает скорость роста трещины в глубину и вызывает расклинивающий эффект продуктов коррозии. Основными факторами, определяющими интенсивность развития явления коррозионной усталости, являются: активность коррозионной среды, уровень действующих циклических напряжений, число циклов нагружения в единицу времени, прочность и коррозионная стойкость сплава. Для повышения долговечности деталей машин, работающих в условиях совместно-

го действия коррозии и циклических напряжений, следует изолировать рабочую поверхность детали от коррозионной среды, снизить величину и цикличность напряжений, действующих в поверхностных волокнах металла.

7. Термическая усталость материалов

Многие детали оборудования в процессе эксплуатации подвергаются воздействию постоянных и циклически изменяющихся температур. Так, ножи и диски пил горячей резки наряду с динамическим и изнашивающим воздействием разрезаемого металла испытывают значительные термические напряжения, возникающие при многократных повторных нагревах в процессе эксплуатации. В аналогичных условиях работают и прокатные валки. Деформируемый металл, вызывая в валке нормальные и касательные напряжения, разогревает поверхностный слой до значительных температур; последующее быстрое охлаждение за счет большой массы вала приводит к увеличению абсолютной величины напряжений. В результате многократных нагревов и охлаждений резко увеличиваются термические напряжения, а на поверхности вала образуется сетка трещин; появление последней вызывает необходимость выработки вала. В еще более тяжелых условиях работают хоботы завалочных машин. Они подвергаются деформации изгиба (воздействие мулды) и многократным нагревам и охлаждениям по периметру и длине рабочей части хобота и мундштука. Разогреву и растрескиванию подвергаются также рабочие поверхности пропусков и проводок прокатных станов, роликов рольгангов, кернов клещевых кранов и др.

После образования трещин изменяются условия теплообмена между деталью (ножом, диском пилы, валком, хоботом и др.) и окружающей средой (деформируемым металлом, воздухом, охлаждающей водой, печной атмосферой). Количество тепла, аккумулируемое деталью, возрастает; увеличиваются также число и размер трещин. Накапливаясь, трещины пересекаются, образуя сетку. В результате отдельные участки рабочей поверхности деталей выкрашиваются. Помимо этого, трещины способствуют смятию поверхностного слоя (например, кернов), налипанию разрезаемого металла (особенно к дискам пил) и др.

Разрушение указанных деталей происходит в результате их термической усталости, под которой обычно понимают появление трещин, постепенное разрушение и формирование при переменных термических напряжениях, возникающих в результате циклических нагревов — охлаждений с перепадами температур по сечению деталей.

Переменные напряжения возникают в результате различных воздействий. При равномерном нагреве и охлаждении по сечению стержня с жестко закрепленными концами возникающие напряжения пропорциональны $\alpha \Delta T$, где α — коэффициент линейного

расширения; ΔT — градиент температур; E — модуль упругости. В данном случае наблюдаются равномерно распределенные по поперечному сечению стержня остаточные напряжения 1-го рода и соответствующие структуре сплава напряжения 2-го рода. При

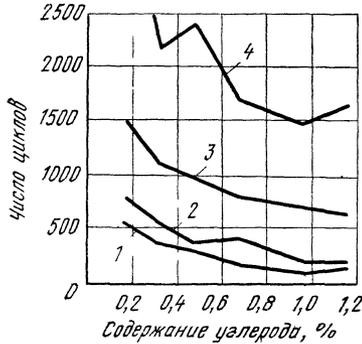


Рис. 1.9. Влияние содержания углерода в стали на ее сопротивление термической усталости при максимальных температурах цикла $t_{ц\max}$, °С:

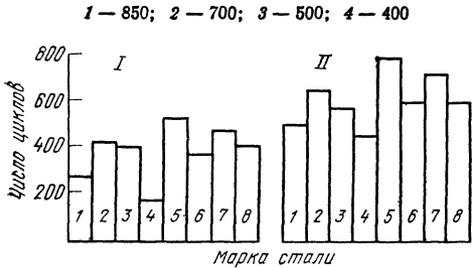


Рис. 1.10. Сопротивление термической усталости сталей при испытании по режимам I ($t_{ц\max} = -750^\circ\text{C}$, охлаждение в воде) и II ($t_{ц\max} = -750^\circ\text{C}$, охлаждение на воздухе):

1 — 6ХС; 2 — 6ХВ2С; 3 — 40Х9С2; 4 — 65; 5 — 3Х2В8Ф; 6 — 5ХНМ; 7 — 40Х10С2М; 8 — 35ХМ

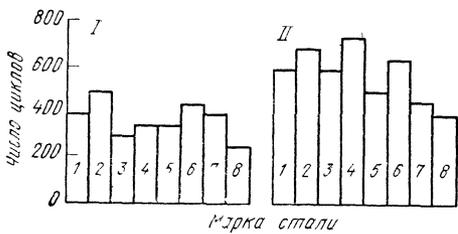


Рис. 1.11. Сопротивление термической усталости сталей, применяемых для изготовления корпусов и надставок тележек обжиговых и агломерационных машин, при испытании по режимам I ($t_{ц\max} = -800^\circ\text{C}$, охлаждение в воде) и II ($t_{ц\max} = -800^\circ\text{C}$, охлаждение на воздухе):

1 — 12Х18Н10ТЛ; 2 — 12Х18Н10Т; 3 — 15ХМЛ; 4 — 15ХМ; 5 — 40Х6С2МЛ; 6 — 40Х6С2М; 7 — 40Х10С2МЛ; 8 — 40Х10С2М

неравномерном нагреве — охлаждении свободного образца за счет создания градиента температур ΔT — происходит внутренняя компенсация напряжений, т.е. термические напряжения уравниваются не на опорах, а в самом материале стержня. Распре-

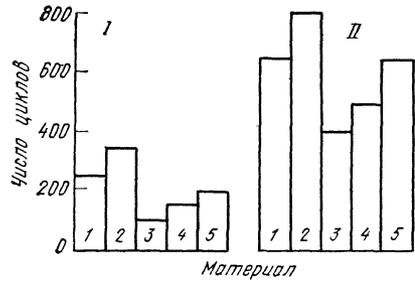


Рис. 1.12. Сопротивление термической усталости материалов, применяемых для изготовления колосников тележек обжиговых и агломерационных машин, при испытании по режимам I ($t_{ц\max} = -800^\circ\text{C}$, охлаждение в воде) и II ($t_{ц\max} = -800^\circ\text{C}$, охлаждение на воздухе):

1 — X28Л; 2 — 20Х17; 3 — перлитный чугуи; 4 — ферритный чугуи; 5 — высокохромистый чугуи

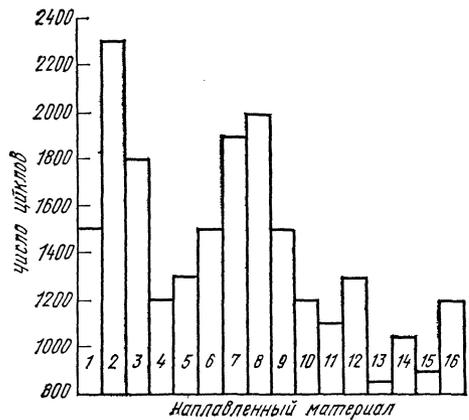


Рис. 1.13. Сопротивление термической усталости наплавленных образцов, испытанных в условиях, имитирующих температурные условия эксплуатации деталей загрузочных устройств доменных печей ($t_{ц\max} = -500^\circ\text{C}$, охлаждение на воздухе):

1 — сталь 35; 2 — 30ХГСА; 3 — 3Х2В8Ф; 4 — Х12ВФ; 5 — У16Х17Н2; 6 — 110Г13; 7 — Х20Н10Г6; 8 — 12Х18Н9Т; 9 — 20Х13; 10 — У20Х17Т; 11 — сплав сормайт 1; 12 — сормайт 2; 13 — сталлит; 14 — Т-590; 15 — Т-620; 16 — Т-540

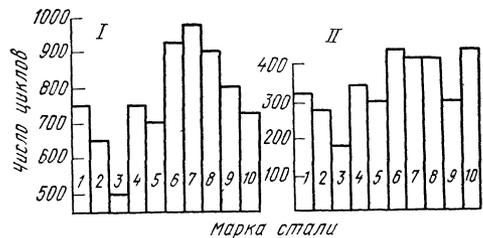


Рис. 1.14. Сопротивление термической усталости образцов, испытанных в условиях, имитирующих условия работы хобота завалочной машины; испытания проводились по режимам I (нагрев 90 с, охлаждение 30 с на воздухе) и II (нагрев 90 с, охлаждение 90 с в воде):

1 — сталь 25; 2 — 45; 3 — 65; 4 — 20Х; 5 — 40Х; 6 — 30ХГСА; 7 — 38ХГН; 8 — 37ХН3А; 9 — 6ХС; 10 — 6ХВ2С

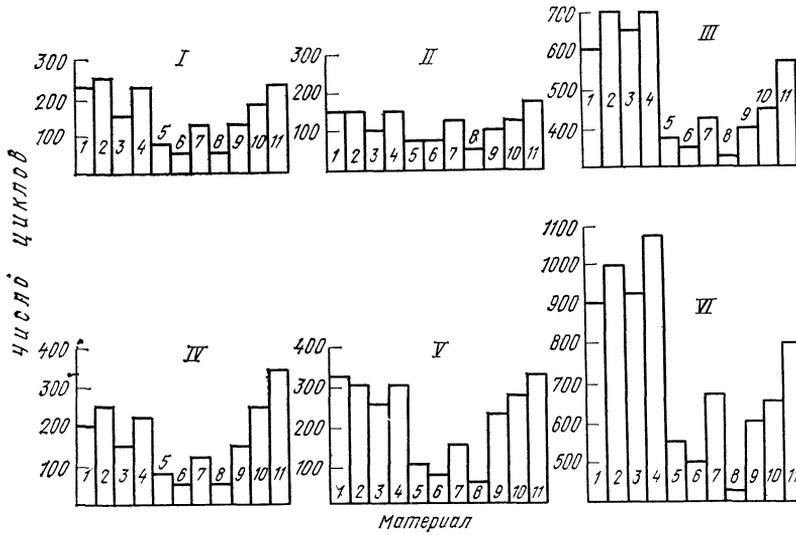


Рис. 1.15. Сопротивление термической усталости валковых материалов при испытаниях по режимам I—VI (применительно к валкам трехвалкового листового стана, см. табл. 1.5):

1 — сталь 50; 2 — 50ХН; 3 — 60ХГ; 4 — 30ХГСА; 5 — серый чугун на ферритной основе; 6 — серый чугун на перлитной основе; 7 — хромистый чугун, модифицированный магнием; 8 — хромистый чугун со сквозным отбелом; 9 — наплавленный слой 30ХГСА; 10 — наплавленный слой 12Х18Н10Т; 11 — наплавленный слой 3Х2В8Ф

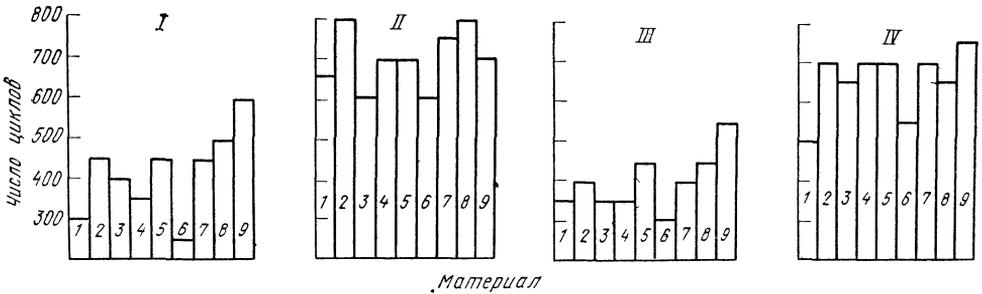


Рис. 1.16. Сопротивление термической усталости образцов, имитирующих валки стана 120, при испытаниях по режимам I—IV (см. табл. 1.5):

1 — сталь 45; 2 — 30ХГСА; 3 — 50ХН; 4 — 60ХГ; 5 — 38ХГН; 6 — 6ХС; 7 — 6ХВ2С; 8 — 5ХНМ; 9 — 3Х2В8Ф

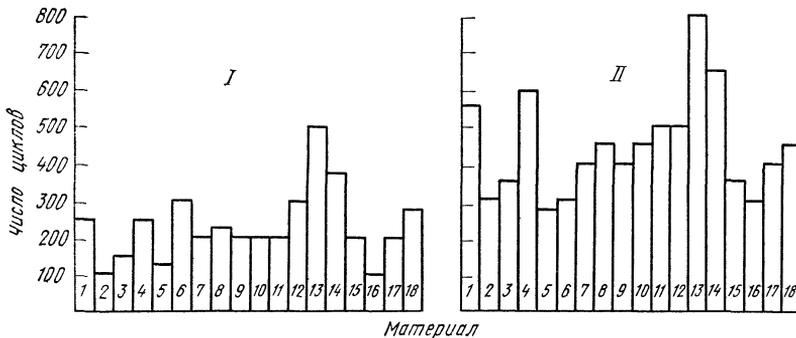


Рис. 1.17. Сопротивление термической усталости материалов для проводок прокатных станов при испытании по режимам I (нагрев 30 с, охлаждение 20 с в воде) и II (нагрев 30 с, охлаждение 20 с на воздухе).

1 — сталь 15 цементированная; 2 — сталь 15 цементированная и закаленная; 3 — сталь 15 цементированная, закаленная и хромированная; 4 — сталь 20Х цементированная; 5 — сталь 20Х цементированная и закаленная; 6 — сталь 20Х цементированная, закаленная и хромированная; 7 — сталь 45 закаленная; 8 — сталь 45 закаленная и хромированная; 9 — сталь 37ХН3А закаленная; 10 — сталь 37ХН3А закаленная и хромированная; 11 — сталь 30ХГСА закаленная; 12 — сталь 30ХГСА закаленная и хромированная; 13 — сталь 12Х18Н9Т закаленная; 14 — сталь 40Х9С2 закаленная; 15 — ферритный чугун; 16 — перлитный чугун; 17 — низколегированный чугун; 18 — высокохромистый чугун

деление остаточных напряжений в материале изделия в этом случае неравномерно. Поверхностные слои монокристаллов подвергаются сложной локальной деформации; блоки поворачиваются на различные углы, изгибаются в разных плоскостях и направ-

характер. Сказанное свидетельствует о нелинейной зависимости термических напряжений 1-го и 2-го рода от температуры и температурных градиентов.

На практике многие детали имеют обычно и жесткое крепление и значительные гра-

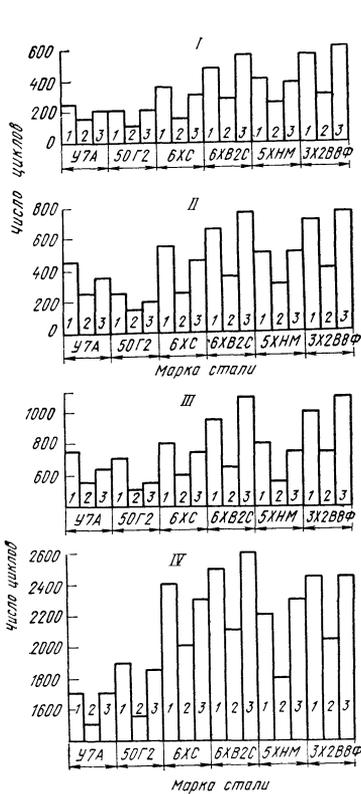


Рис. 1.18. Сопrotивление термической усталости сталей для ножей горячей резки, подвергнутых отжигу (I), закалке и отпуску при температуре 400° С (2) и закалке и отпуску при температуре 600° С (3), при испытании по режимам I (850° С), II (700° С), III (500° С) и IV (400° С). Охлаждающая среда при испытаниях — вода

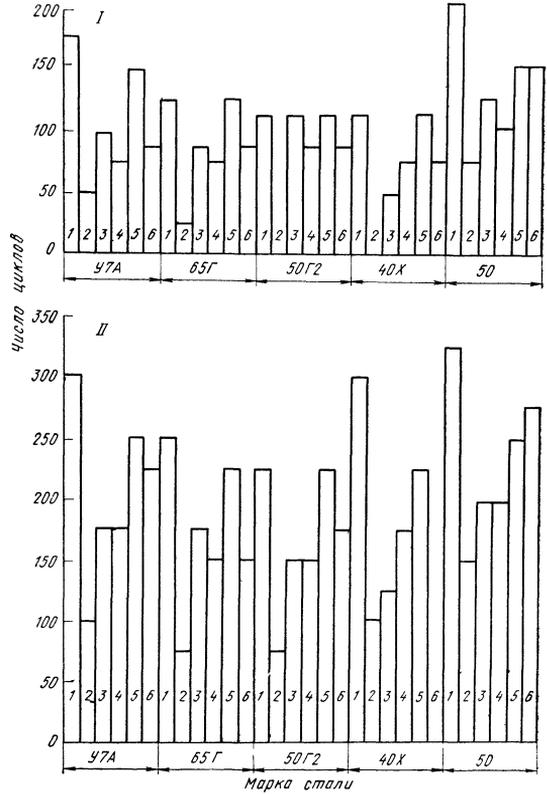


Рис. 1.19. Сопrotивление термической усталости сталей для пил горячей резки, подвергнутых различной термической обработке:

1 — отжигу; 2 — газопламенной закалке; 3 — газопламенной закалке с последующим отпуском; 4 — высокочастотной закалке; 5 — высокочастотной закалке с последующим отпуском; 6 — электродно-контактной закалке; I — охлаждение в процессе испытаний в воде; II — то же, на воздухе. Максимальная температура цикла $t_{цмак} = 800^{\circ} \text{C}$

лениях и монокристаллы дробятся. Эти изменения вызываются пластической деформацией при действии соответствующих термических напряжений.

Напряжения 2-го рода возникают при изменении температуры и приложении напряжений 1-го рода вследствие следующих факторов: неоднородности материала, вызывающей различия в коэффициентах термического расширения отдельных кристаллов и фаз; неодинаковой зависимости E и α от температуры у отдельных зерен; различной ориентации зерен, препятствующей свободному изменению размеров отдельных зерен при повышении и понижении температуры; субмикроскопической (мозаичной) неоднородности в кристаллах. Распределение напряжений 2-го рода в микрообъемах в большинстве случаев носит статистический

характер. Поэтому практический интерес представляют суммарные остаточные напряжения, возбуждаемые в деталях обоими рассмотренными способами.

Сопrotивление термической усталости, помимо условий эксплуатации деталей (максимальная температура цикла, температурный градиент и др.), зависит от теплофизических свойств материалов. К их числу следует в первую очередь отнести химический состав, определяющий теплопроводность и другие физические свойства; условия термической обработки, определяющие структурное состояние материала; наклеп, определяющий напряженное состояние исследуемого объекта, и т. д.

Влияние химического состава, условий термической обработки, структурного состояния, вида заготовки (поковка, литье),

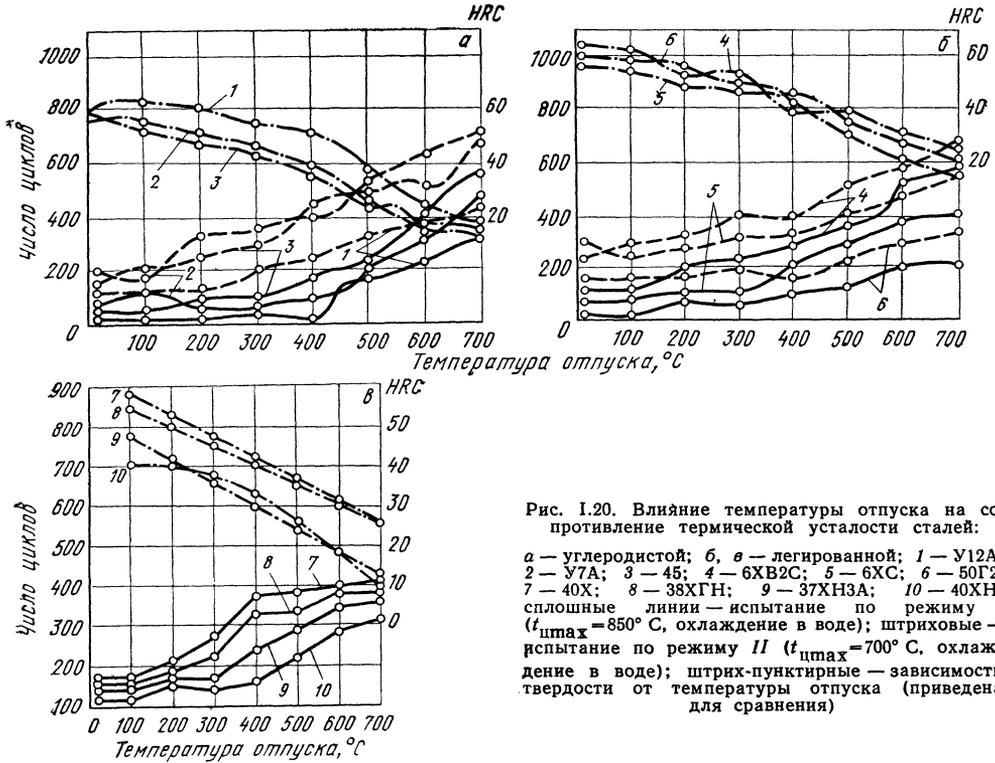


Рис. 1.20. Влияние температуры отпуска на сопротивление термической усталости сталей:
 а — углеродистой; б, в — легированной; 1 — У12А; 2 — У7А; 3 — 45; 4 — 6ХВ2С; 5 — 6ХС; 6 — 50Г2; 7 — 40Х; 8 — 38ХГН; 9 — 37ХН3А; 10 — 40ХН; сплошные линии — испытание по режиму I ($t_{ц\max} = 850^\circ\text{C}$, охлаждение в воде); штриховые — испытание по режиму II ($t_{ц\max} = 700^\circ\text{C}$, охлаждение в воде); штрих-пунктирные — зависимость твердости от температуры отпуска (приведена для сравнения)

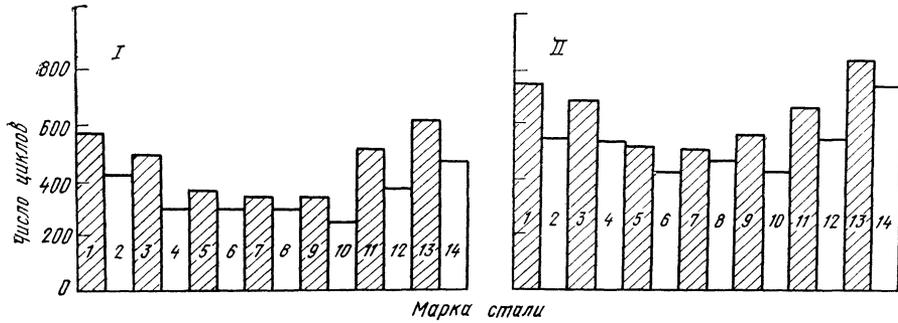


Рис. 1.21. Сопротивление термической усталости различных сталей при испытании по режимам I ($t_{ц\max} = 800^\circ\text{C}$, охлаждение в воде) и II ($t_{ц\max} = 700^\circ\text{C}$, охлаждение в воде):
 1, 2 — сталь 15; 3, 4 — 20Х; 5, 6 — 40Х; 7, 8 — 40ХН; 9, 10 — 6ХС; 11, 12 — 6ХВ2С; 13, 14 — 3Х2В8Ф. Заштриховано для образцов, не подвергавшихся окислению до испытаний

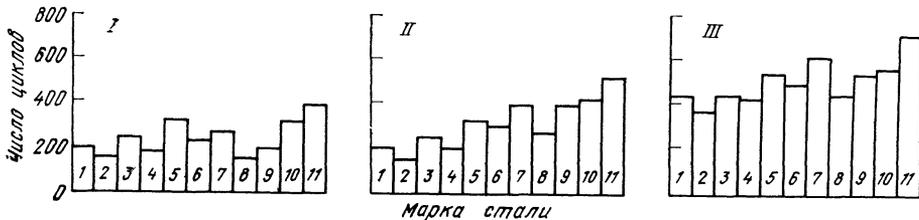


Рис. 1.22. Влияние цементации и хромирования на сопротивление термической усталости некоторых конструкционных сталей при испытании по режимам I ($t_{ц\max} = 700^\circ\text{C}$, охлаждение в воде); II ($t_{ц\max} = 700^\circ\text{C}$, охлаждение под водяным душем) и III ($t_{ц\max} = 700^\circ\text{C}$, охлаждение на воздухе). Без термической обработки: 1 — сталь 15; 4 — 20Х; 6 — 45; 8 — 37ХН3А; 10 — 30ХГСА. Цементация с последующим хромированием: 3 — сталь 15; 5 — 20Х. Цементация: 2 — сталь 15. Хромирование: 7 — сталь 45; 9 — 37ХН3А; 11 — 30ХГСА

Таблица 1.4
Результаты испытания легированных сталей на термическую усталость

Марка стали	Число циклов до образования трещин при испытании по режимам			
	I	II	III	IV
50Г	260	300	800	1850
50Г2	225	275	650	1300
40Х	400	450	1100	3500
37ХНЗА	300	375	1100	4500
40ХН	375	425	1050	3500
45	320	370	980	2800

Примечание. Максимальная температура цикла, °С: I—850; II—700; III—500; IV—400. Охлаждение при всех режимах — в воде.

случаи поломок вследствие неправильной эксплуатации (значительные вибрации и перегрузки, местный нагрев и др.).

Тщательный анализ условий работы деталей и сопоставление их с характером излома, внешним состоянием, типом дефектов, а также с результатами расчетов на прочность и определения напряжений в большинстве случаев позволяют установить причины разрушения отдельных деталей и разработать мероприятия, предупреждающие поломки в дальнейшем.

Исследование причин поломок деталей рекомендуется проводить в следующей последовательности:

1. Оценка общего состояния объекта исследования. При этом осматривают узлы, чтобы выявить повреждения и разрушения отдельных деталей; изучают обстоятельства

Таблица 1.5

Режимы испытания образцов на термическую усталость, имитирующие температурные изменения в валах

Тип прокатного стана	Режимы испытаний	Первый период цикла			Второй период цикла		
		продолжительность нагрева, с	продолжительность охлаждения, с	охлаждающая среда	продолжительность нагрева, с	продолжительность охлаждения, с	охлаждающая среда
Листовой трехвалковый	I	20	5	Водяной душ	10	10	Водяной душ
То же	II	40	20	То же	15	10	То же
» »	III	40	20	Воздух	20	10	Воздух
» »	IV	20	20	Вода	20	20	»
» »	V	40	40	»	—	—	—
» »	VI	40	40	Воздух	—	—	—
120	I	50	50	Вода	—	—	—
120	II	50	50	Воздух	—	—	—
120	III	60	20	Вода	—	—	—
120	IV	20	60	»	—	—	—

окарины, химико-термической обработки и гальванических покрытий на сопротивление сталей и чугунов термической усталости приведено на рис. 1.9—1.22 и в табл. 1.4.

Режимы испытаний на термическую усталость применительно к прокатным валам приведены в табл. 1.5 (см. рис. 1.15 и 1.16).

Критерием сопротивления стали термической усталости при всех испытаниях являлось появление трещин на поверхности образцов или деталей после определенного числа циклов.

8. Поломки деталей машин

Многолетние наблюдения показывают, что поломки деталей машин вызываются низким качеством материала, не совершенной технологией изготовления деталей, грубой механической обработкой, случайными механическими повреждениями поверхности и другими факторами, активно снижающими циклическую прочность деталей. Нередки

их разрушения и внешние признаки, которыми оно сопровождалось. При поломках возможны повреждения сопряженных деталей, вибрации, дым, течь и т. д. При оценке общего состояния объекта устанавливают продолжительность и режим работы деталей механизма, характер отклонения от нормального режима. Таким образом, на этом этапе устанавливают возможные причины аварии, чтобы в процессе последующего исследования определить истинные причины поломок.

2. Анализ внешнего состояния разрушенных, поврежденных и сопряженных с ними деталей. Анализ начинают с поисков детали, которая разрушилась первой. После этого устанавливают последовательность в разрушении детали, определяют места зарождения трещин и расположение концентраторов напряжений. Концентраторы напряжений оценивают по их форме и строению излома. Устанавливают действующие нагрузки, степень перегрузки при повторных нагружениях и выявляют отклонения в ра-

боте разрушившейся детали. Все повреждения деталей в зависимости от их происхождения делят на две группы. К первой относятся повреждения, возникающие при поломке детали. Анализ этих повреждений, выполненный с учетом особенностей кинематики узла и условий нагружения деталей, позволяет установить последовательность в разрушении деталей и найти деталь, разрушившуюся первой. Ко второй группе относят повреждения, возникающие в процессе работы агрегата или механизма до поломки, например чрезмерный износ, выработка, следы сильной коррозии и г. д. Эти повреждения в ряде случаев могут указать на нарушение нормальных условий работы детали, и установление их связи с поломкой играет в таких случаях существенную роль при определении причин разрушения.

При анализе учитывают влияние различных факторов (конструктивных, эксплуатационных и технологических) на прочность деталей и вид излома. К числу конструктивных факторов обычно относят конструкцию, форму и размеры изделий и их элементов, концентраторы напряжений, зазоры, посадки, запас прочности и методы расчета на прочность, характер и скорость приложения нагрузки и т. п.; к эксплуатационным — условия эксплуатации (температура и физико-химические свойства окружающей среды), виды смазки, качество ремонта и ухода, соблюдение правил технической эксплуатации (нагрузки, скорости, давления и другие параметры должны изменяться в пределах, предусмотренных техническими условиями на изготовление и приемку машины); к технологическим — факторы, связанные с процессом плавки и получением металла требуемой прочности, структуры, химических и физико-механических свойств, а также факторы, связанные с формообразованием заготовки и дальнейшей обработкой деталей и сборкой машин. Сюда же следует отнести организацию контроля на всех этапах производства и разработку надежных и простых средств контроля. В реальных условиях прочность определяется совместным действием перечисленных факторов

Из всех видов изломов наиболее часто встречаются усталостные. Отличительной особенностью усталостных изломов является наличие четко выраженных зон усталостного разрушения с мелкозернистой, фарфоровидной или шлифованной поверхностью и зоны статического излома — остальной части сечения с волокнистым строением для вязких металлов или крупнозернистым строением для хрупких материалов. В изломе можно обнаружить следующие характерные зоны: а) зарождения усталостной трещины (микроскопические и макроскопические локальные участки); б) развития усталостной трещины (зона усталостного разрушения); в) ускоренного распространения усталостной трещины (переходная зона); г) окончательного быстрого разрушения (статического разрушения или долома).

Характер излома в основном определяется действующими напряжениями: чем

выше перегрузка, тем меньше собственно усталостная зона и больше зона долома. При больших перегрузках может возникнуть несколько очагов разрушения (развития трещин), которые затем могут сливаться и давать несколько зон усталостного разрушения. Блеск поверхности увеличивается с уменьшением перегрузок и возрастанием числа циклов нагружений.

Усталостные разрушения не сопровождаются заметной пластической деформацией даже у мягких углеродистых сталей. При действии переменных напряжений никаких «перерождений» или перекристаллизации металла не наблюдается. Основной металл не изменяет своей структуры и пластических свойств. При рентгеноструктурных исследованиях усталостного излома наблюдаются изменения в атомной решетке только в месте образования трещины. Эти изменения подобны изменениям при статических разрушениях; при усталостных разрушениях они носят локальный характер. Такое сходство между усталостными и статическими разрушениями свидетельствует о том, что возможны определенные количественные зависимости между параметрами, характеризующими эти виды механических испытаний. При развитии трещина проникает в глубь сечения; при этом образуется линия фронта ее продвижения. Эта линия разделяет сечение на две части — разрушенную и неразрушенную. На скорость продвижения линии фронта трещины и ее отдельных точек влияют величина и характер действующих напряжений.

На основе многочисленных исследований была составлена классификация строения усталостных изломов (рис. 1.23). Эту классификацию можно использовать для оценки вида и характера действующих нагрузок, а также для приближенного анализа наблюдаемых на практике усталостных разрушений. Представленные схемы показывают особенности зарождения трещин и характер продвижения линии фронта усталостной трещины в зависимости от вида и характера нагружения. Под умеренными напряжениями следует понимать напряжения, соответствующие нижней половине наклонной части кривой усталости, а под высокими напряжениями — верхней половине. Тот факт, что усталостные разрушения начинаются с образования трещин, позволяет сделать вывод, что эти разрушения происходят при наличии локальных концентраторов напряжений в виде трещин, развитие которых приводит к разрушению. Поэтому трещины можно назвать естественными локальными концентраторами.

В табл. 1.6 приведены основные данные для ряда наблюдавшихся случаев разрушений деталей металлургического оборудования.

Характер изломов в этих случаях различен. Анализ изломов, условий работы и металлографические исследования помогают установить основные причины, которые вызвали разрушение этих деталей.

3. Оценка качества изготовления и материала детали. При этом необходимо проверить соответствие их геометрических разме-

Т а б л и ц а 1.6.
Характеристика поломок некоторых деталей металлургического оборудования

Наименование детали	Марка стали	Обработка	σ_T	σ_B	$\delta, \%$	$\psi, \%$	$a_H,$ кгс·м/см ²
			кгс/мм ²				
1	2	3	4	5	6	7	8
Трансмиссионный вал переднего рольганга блюминга 950	45	Без термической обработки	35—36	61—63	20—22	43—44	5,5—6,5
То же	30X	Нормализация	28—34	59—62	16—18	39—42	5,4—6,0
Трансмиссионный вал рольганга двухвалковой клетки стана 810	50	Без термической обработки	35—38	57—60	16—19	36—40	5—6
Вал редуктора набрасывателя проволочного стана 260	35	То же	26—29	51—53	25—29	47—51	6,8—8,0
Муфта привода горизонтальных валков слябинга	45	Наплавка лопатки с одной стороны	27—30	56—58	21—23	33—38	4,0—4,5
Коренной вал маховика стана 550	35	Без термической обработки	30—33	52—53	24—26	53—54	7,0—10,2
Вал подъемного стола стана 550	35	Поверхностная закалка	24—25	51—55	25—28	38—50	6,4—8,1
Коренной вал подъемного стола стана 500	45	Без термической обработки	25—30	60—61	18—20	31—33	5,3—6,5
Коленчатый вал ножниц	45XH	То же	—	64—68	18—21	40—44	3,8—4,7
Вал редуктора привода манипулятора блюминга 1150	35	Нормализация	—	54—56	22—24	51—54	6,0—10,0
Ось шкива скипового подъемника доменной печи	45	То же	33—34	62—63	22—23	47—50	4,3—4,6
Ось скипа	35	Поверхностная закалка	27—34	52—57	24—30	44—48	6,8—7,6

Макроструктура	Микроструктура	Характеристика излома	Причины поломки
9	10	11	12
Ликвационный квадрат и общая пористость	Перлитно-ферритная крупнозернистая с участками видманштеттовой структуры	Ступенчатый усталостный на 75% сечения	Крупнозернистая видманштеттовая микроструктура и перегрузки
Равномерное распределение мелких сегрегационных точек	Перлитно-ферритная (величина зерна балл 4—5)	Мелкозернистый с заполированными участками на 40% сечения	Пониженные механические свойства
То же	Крупные зерна перлита, ферритная сетка	Мелкозернистый матовый; видны следы усталостного разрушения	Неметаллические включения и видманштеттовая микроструктура
Ликвационный квадрат	Перлитно-ферритная (величина зерна балл 2—6)	Неровный с вырывами; трещина распространялась внутри вала	Неоднородность структуры по сечению
Равномерное распределение сульфидов	Перлитно-ферритная крупнозернистая, участки видманштеттового строения	Усталостный на 10% сечения	Отсутствие плавных переходов от лопатки к муфте; неоднородность структуры; резкий переход от наплавленного к основному металлу
Следы зональной сегрегации	Перлитно-ферритная (величина зерна балл 4—5)	Усталостный фарфоровидный на 80% сечения	Перегрузки и наличие запрессованной муфты
Ликвационный квадрат	В центре перлитно-ферритная (балл 3—4); на поверхности — троосто-мартенситная	Усталостный ступенчатый на 70% сечения	Неравномерная закалка, видманштеттовая структура сердцевин и крупноигльчатый мартенсит поверхности
Равномерное распределение сегрегационных скоплений	Перлитно-ферритная крупнозернистая, скопления феррита	Усталостный ступенчатый почти на 100% сечения	Низкие свойства и крупнозернистая структура
Повышенная загрязненность ликватами	Перлитно-ферритная крупнозернистая	Усталостный слабо-выраженный, шиферность	Резкий переход между сечениями, загрязненность металла
Равномерное распределение сегрегационных скоплений	Феррито-перлитная мелкозернистая	Усталостный	Образование трещин усталости по шпоночным канавкам
То же	Перлитно-ферритная (величина зерна балл 4—5)	Усталостный почти на 100% сечения	Работа при напряжениях, близких к пределу усталости
То же	В центре — перлитно-ферритная крупнозернистая; на поверхности — среднеигльчатый мартенсит	Усталостный фарфоровидный	Неравномерная закалка

Наименование детали	Марка стали	Обработка	σ_T	σ_B	$\delta, \%$	$\psi, \%$	$a_H,$ кгс·м/см ²
			кгс/мм ²				
1	2	3	4	5	6	7	8
Вал ведущего колеса сталевоза	45	Без термической обработки	36—39	59—63	17—19	39—43	5,4—6,2
Вал барабана грейферного крана	50	—	33—35	58—60	18—21	48—51	0,8—1,6
Верхний вал шестеренной клетки стана 900	60X	Нормализация с отпуском	—	98—100	9—12	19—26	1,5—2,0
Нижний вал шестеренной клетки стана 900	60X	То же	71—74	98—99	8—9	26—28	1,6—2,1
Головка шпинделя привода валков блюминга	50XH	То же	—	60—67	2—6	15—16	2,6—3,2
Щека универсальной головки шпинделя валка клетки 750	40X	Закалка с самоотпуском	62—74	86—100	10—14	33—50	2,5—4,4
Штанга большого конуса	15	Нормализация	25—28	38—41	25—28	62—66	10,5—12,5
Вал двигателя привода стана 500	45	Наплавка	50—53	80—84	17—18	47—51	6,6—6,7

ров чертежу, качество механической, термической и химико-термической обработок, наличие флокенов, трещин термического происхождения и других дефектов металлургического происхождения (газовых пузырей, неметаллических включений, сильно выраженной ликвации, расслоений, усадочной рыхлости и др.), установить механические характеристики разрушившегося изделия и др.

4. Анализ условий работы деталей. При этом анализе устанавливают недостатки применяемой конструкции (наличие концентраторов напряжений, недостаточное поступление смазки, неправильный подбор материалов контактирующих пар, неправильное назначение зазоров в сочленении деталей, неработоспособность узла, наличие значительных перегрузок и т. д.).

Тщательный анализ условий работы деталей и сопоставление полученных данных с видом излома, данными внешнего осмотра и другими, а также с результатами расчетов на прочность, определения напряжений и в отдельных случаях стендовых испытаний в подавляющем большинстве случаев позволяют установить причины раз-

рушения отдельных деталей и разработать рекомендации, предупреждающие поломки.

9. Особенности износа деталей металлургического оборудования

Оборудование агломерационных цехов

Среди оборудования агломерационных цехов, подверженного интенсивному изнашиванию, следует в первую очередь назвать элементы ротора эксгаустера, спекательных и обжиговых тележек, питателей, дробильного оборудования и др. Как правило, износ вызывается истиранием рудой и агломератом, обладающими высокими абразивными свойствами. Большое влияние на истирание оказывают насыщенные абразивной пылью газ и воздух и повышенные температуры.

Ротор эксгаустера. Основными изнашивающимися элементами ротора эксгаустера являются рабочие лопатки и прилегающие к ним плоскости основного и покрывающих дисков. Износ лопаток наблюдается со стороны входа потока насыщенного твердыми

Макроструктура	Микроструктура	Характеристика излома	Причины поломки
9	10	11	12
То же	Перлитно-ферритная (величина зерна балл 1), видманштеттовая	Заполненные участки	Наличие подреза и крупнозернистая структура
То же	Перлитно-ферритная; строчечность выражена слабо	Усталостный однородный	Подрез и загрязненность неметаллическими включениями
То же	Перлитная; у поверхности зерно крупнее, чем в центре	Ровный, однородный	Кратковременная перегрузка
Пятнистая ликвация, темная зона и трещины	В центре перлитная; в темной зоне и рядом с ней троостомартенситная	Неоднородный с вырывами глубиной до 25 мм	Напряжения, возникающие при поверхностной подкалке вала
Пятнистая ликвация, флокены	Перлитно-ферритная, скопления феррита	Отсутствуют следы старой трещины	Низкие свойства из-за ликвации и флокенов
Равномерное распределение сегрегационных скоплений	Поверхность — троостосорбит, в сердцевине — перлит и феррит	Однородный кристаллический	Прокатка буртами валков, увеличение крутящего момента
То же	Феррито-перлитная мелкозернистая (балл 6—8)	Усталостный мелкозернистый	Чрезмерный износ; концентрация напряжений
Наличие раковин и трещин в наплавленном слое	Перлитно-ферритная неоднородная по величине (в наплавленном слое)	Усталостный на 70% сечения	Некачественная наплавка

частицами газа в месте прилегания их к основному диску. В этих участках образуются сквозные свищи, расположенные вдоль лопатки и плавно сужающиеся вдоль потока. Основной диск изнашивается в участках прилегания к нему полок лопаток. В теле диска образуются выемки, сечение которых уменьшается в направлении от входа к выходу потока. Наиболее интенсивному изнашиванию подвержена часть диска, заключенная между лопаткой и ступицей. Вследствие одновременного действия двустороннего потока газов износ вызывает резкое утонение тела диска и снижение его прочности. Покрывающий диск изнашивается в участках прилегания гильной стороны лопатки с увеличением выработки к выходу потока. Входящий поток газа изнашивает также ступицу и защитное кольцо вала.

Агломерационная и обжиговая машины. Интенсивному изнашиванию подвергаются детали спекательных и обжиговых тележек агломерационных машин — корпус, надставка, колосники, ходовые ролики, уплотнительные пластины. Условия эксплуатации корпусов, надставок и колосников осложняются нестационарным тепловым режимом.

Износу и развитию трещин способствует газовая коррозия, особенно при наличии в среде сернистых соединений. Как правило, причинами замены спекательных и обжиговых тележек являются прогиб корпуса, обгорание полок и появление многочисленных мелких разгарных трещин. У колосников наибольшему изнашиванию подвергаются верхние рабочие приливы. Вся поверхность колосников испытывает интенсивное окисление. Если в первый период эксплуатации поверхность под окалиной изнашивается равномерно, то в последующем она становится неровной, изъеденной. Ходовые ролики и уплотнительные пластины эксплуатируются в основном в стационарном температурном режиме. Износ их связан с трением металла о металл. Износ уплотнительных пластин равномерен по всей поверхности. Величина предельного износа не превышает 5 мм. Срок службы достигает трех лет. Износ ходовых роликов менее равномерен. Поверхность катания изнашивается на величину до 5 мм. Изнашивание реборд отмечается лишь на участках, примыкающих к поверхности катания, причем величина износа мала (<1 мм). Износ

Характер нагруже- ния Вид нагружения	Умеренное напряжение			Высокое напряжение		
	Естественный локальный концентратор	Слабый концентратор по окружности	Сильный концентратор по окружности	Естественный локальный концентратор	Слабый концентратор по окружности	Сильный концентратор по окружности
Растяжение						
Односторонний изгиб						
Двусторонний изгиб						
Изгиб при вращении						

Рис 1.23. Классификация (схема) строения усталостных изломов при различных видах и характерах нагрузений (по В. М. Гребенику)

носика ножа для срезания агломерата достигает 50 мм. По остальной длине ножа величина износа менее значительна, однако превышает 5 мм. Срок службы ножей обычно составляет 2—3 мес.

Дробильное оборудование. Изнашивание деталей дробильного оборудования происходит в результате истирающего воздействия измельчаемых руды или известняка. В ряде случаев изнашивание сопровождается

Износ нижнего банджа четырехвалковой коксовой дробилки более значителен в средней части по длине; здесь его величина достигает 10 мм по диаметру до перегородки и 160 мм с учетом перегородок. На участках, близких к торцам, износ относительно невелик. В квадрате отбойного фартука одновалковой дробилки отмечается интенсивный равномерный износ рабочей плоскости. Величина износа достигает 6—8 мм.

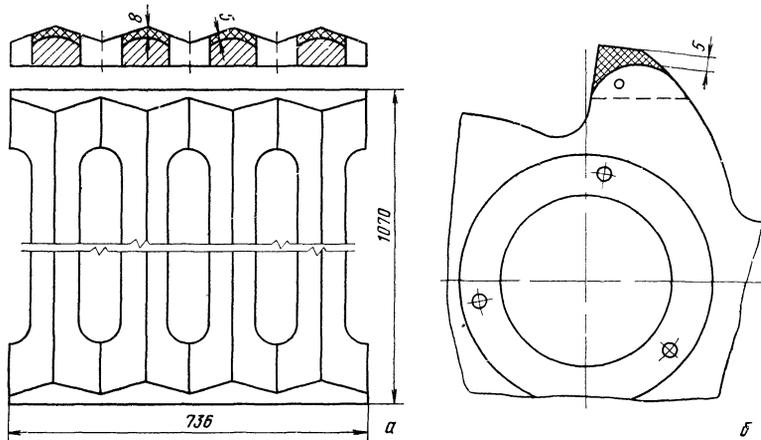


Рис. 1.24. Характер износа дробильной плиты (а) и зубьев звездочки (б) одновалковой дробилки

ется интенсивными ударами и давлением. В молотковых дробилках наибольший износ наблюдается на молотках, колосниках, дробящих плитах, а также уплотняющем диске ротора. Величина износа молотков достигает 50 мм. Износ неравномерен. Более интенсивно изнашиваются участки, примыкающие к боковой поверхности рабочей части молотка. Неравномерно изнашиваются и колосники. Максимальный износ, достигающий 40 мм, наблюдается в средней части длины колосника. Ближе к торцам интенсивность изнашивания резко уменьшается и на участках, не соприкасающихся с дробимым материалом, износ практически отсутствует. Износ уплотняющего диска ротора вызывается в основном потоками запыленного воздуха. Изнашивается преимущественно наружная коническая поверхность на длине 100 мм. Как правило, величина износа не превышает 3 мм. Дробящие броневые плиты испытывают интенсивные удары кусков известняка. Износ их неравномерен и весьма значителен.

В валковых дробилках наибольшему изнашиванию подвергаются банджи гладких валков и зубья зубчатых валков. Банджи гладких валков в процессе эксплуатации испытывают давление и истирающее воздействие породы, зубья зубчатых валков работают на удар и истирание. Характер износа дробильной плиты и зубьев звездочки одновалковой дробилки показан на рис. 1.24. Износ плиты распространяется на глубину до 8 мм по выступам и до 5 мм по впадинам. В звездочках изнашивается выступающая часть зубьев на глубину 5 мм.

В конусных дробилках интенсивному изнашиванию подвергаются в основном футеровочные плиты подвижного и неподвижного конусов, приемная воронка и другие элементы. Нагрузки несут, как правило, ударный характер. Максимальный износ рабочей поверхности неподвижного дробящего конуса отмечается в узкой части, а подвижного — в широкой. Износ боковой поверхности приемной воронки крайне неравномерен. Величина износа по высоте колеблется в широких пределах и в центральной части превышает 25—30 мм, т. е. более 50% полной толщины стенки воронки. Срок службы воронки при изготовлении ее из стали 110Г13Л достигает 1,5 года.

Питатели. Элементы ленточных и пластинчатых питателей подвергаются интенсивному абразивному изнашиванию. Более других деталей изнашиваются броневые плиты пластинчатых и тарельчатых питателей, ножи тарельчатых питателей, приводные и холостые звездочки, ходовые колеса. Изнашивание приводной звездочки пластинчатого питателя происходит в основном по впадине; износ характеризуется значительной неравномерностью и интенсивностью. Так, износ участков, прилегающих к выступам, достигает 15 мм; в то же время величина износа центра впадины не превышает 3 мм. Более равномерен износ обода ходового колеса. Износ отмечается лишь по поверхности катания; величина его составляет 10 мм. Реборды практически не изнашиваются (за исключением участков, непосредственно примыкающих к поверхности катания, которые изнашиваются на небольшую вели-

чину) Износ броневых плит, как правило, неравномерен. Это связано с характером распределения перемещаемых питателями материалов. В броневых плитах, обработавших несколько месяцев, обнаруживается большое количество выступов, впадин и борозд.

Оборудование доменных цехов

Среди оборудования доменных цехов, подверженного интенсивному изнашиванию, следует в первую очередь назвать элементы загрузочных устройств доменных печей,



способностью его уменьшается в результате воздействия большого числа различных факторов. К этим факторам относят условия работы основных элементов засыпных аппаратов, их конструктивные особенности, технологию изготовления, качество монтажа, а также уход и обслуживание при эксплуатации. Влияние каждого из факторов в большей или меньшей степени проявляется в зависимости от местных специфических условий.

Опыт показывает, что необходимость замены засыпных аппаратов вызывается появлением в их основных элементах следующих дефектов:

1 Износа наружной поверхности конуса по образующей. Параллельно этому отмечается истирание внутренней поверхности

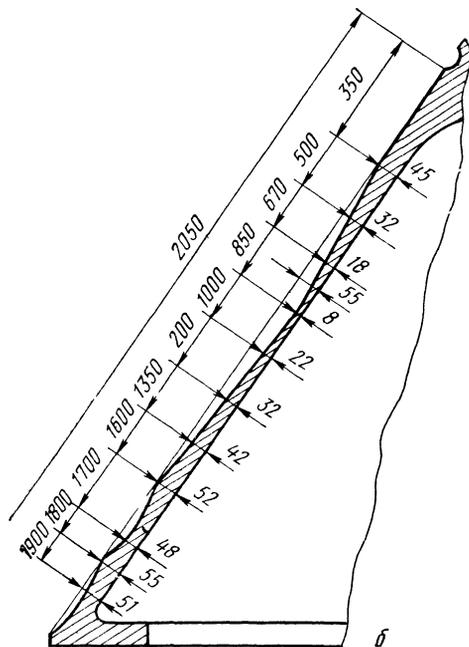


Рис 125 Износ боковой поверхности большого конуса ссыпающейся шихтой
а — общий вид б — сечение по высоте

скипов, атмосферных клапанов, броневых плит тракта перемещения шихтовых материалов, подбункерного оборудования, фурменных приборов, машин для обслуживания чугушной и шлаковой леек и фурм. Как правило, износ оборудования здесь, как и в агломерационных цехах, вызывается истирающим действием руды и агломерата. Однако большая роль принадлежит и насыщенному абразивной пылью колошниковому газу, вырывающемуся из рабочего пространства доменной печи. Повышенные температуры, нестационарный тепловой режим, газовая эрозия — все эти факторы также стимулируют износ элементов оборудования доменных цехов.

Загрузочное устройство. Загрузочное устройство доменной печи работает в очень тяжелых условиях. Одним из первых выходит из строя засыпной аппарат. Рабо-

тающее происходит в результате воздействия шихты, ссыпающейся при загрузке доменной печи.

2 Возникновения сквозных продувов конусов и чаш в участках, расположенных значительно выше контактных поверхностей.

3 Образования неплотностей, выщербин, трещин, свищей и, как следствие этого, продувов на контактных поверхностях и связанных с ними сквозных отверстий в теле конусов и чаш.

На рис 125—127 показан износ отдельных деталей загрузочного устройства доменной печи. На отдельных участках, расположенных выше контактной поверхности (у места падения шихты), толщина тела большого конуса уменьшилась более чем на 60%. В еще большей степени изнасилась контактная поверхность. Во многих участках по ее окружности образовались сквоз-

ные продувы. Выработка малых конусов распространяется в основном на поверхности контакта малого конуса с вращающейся воронкой и располагается концентрически.

Скиповый подъемник. Среди интенсивно изнашивающихся деталей скипового подъемника следует прежде всего назвать броневые плиты скипов, ходовые колеса скипов и канатные шкивы. Износ броневых плит, как правило, неравномерен. Более интенсивно изнашиваются боковые и нижние



Рис. 1.26. Внешний вид контактной поверхности большого конуса после 10 мес работы на доменной печи

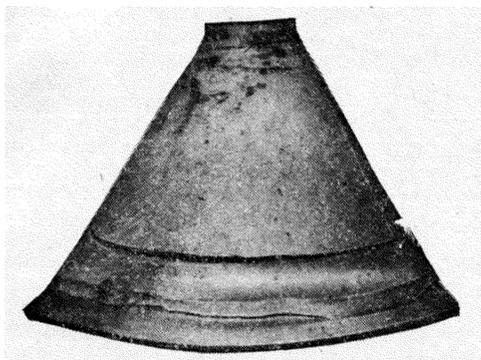


Рис. 1.27. Изнашенный малый конус загрузочного устройства доменной печи

броневые плиты. Изнашенные броневые плиты имеют на своей поверхности многочисленные борозды, выступы и впадины; характер расположения борозд не подчиняется никакой закономерности. Внешний вид изнашенных участков броневых плит в значительной мере зависит от состава материала их поверхности. При применении стали 110Г13Л изнашенные участки, как правило, гладкие; в наплавленных плитах поверхность имеет многочисленные выщербины и отколы. У головного канатного шкива скипового подъемника изнашивается в основном дно ручьев. Износ боковых конических стенок менее значителен. Как правило, убывание степени износа от дна ручья к вершине плавное. Изнашенная поверхность гладкая; лишь в отдельных участках отмечаются небольшие выщербины металла, связанные с высокими удельными усилиями.

Коксовый грохот. Основными изнашивающимися элементами коксового грохота явля-

ются броневые плиты, диски и колосники. Броневые плиты изнашиваются аналогично рассмотренным выше плитам других агрегатов. Зубья дисков изнашиваются весьма интенсивно и неравномерно. На отдельных участках зубья после определенного периода эксплуатации практически полностью исчезают. Колосники за 2 мес изнашиваются более чем на 50% по высоте, причем их износ также неравномерен и особенно значителен вблизи торцов.

Атмосферный клапан. Изнашивание корпуса, конуса и крышки атмосферного клапана происходит по всей окружности контактной поверхности на ширине до 25 мм. Глубина износа может достигать 10 мм. Износ неравномерный; в отдельных участках контактной поверхности отмечаются продувы и выкрошки.

Оборудование прокатных цехов

Интенсивному изнашиванию подвергаются многие элементы прокатного оборудования и, в частности, оборудования прокатных станов, ножниц, пил, правильных машин, рольгангов, крановое оборудование и др.

Валки станов горячей прокатки. Валки являются основным инструментом, поэтому от их стойкости и работоспособности зависят производительность и технико-экономические показатели прокатных станов.

Известно, что при деформации металла в калибрах на контактных поверхностях возникают силы трения, вызывающие износ рабочих поверхностей вала. Вследствие большого давления металла на валки и высокой температуры в зоне контакта вала с прокатываемым металлом происходит тепловой износ, обуславливающий сваривание трущихся поверхностей в микроскопически малых участках с последующим отрывом частичек поверхности вала и уносом их прокатываемым металлом. Растрескивание поверхности ухудшает отвод тепла от точек контакта, что еще больше увеличивает тепловой износ. Величина теплового износа зависит от прочности металла при повышенных температурах: чем меньше снижаются механические свойства при нагреве, тем лучше материал сопротивляется тепловому износу.

Воздействие повышенных температур, воды и воздуха, а также пластическая деформация поверхностных слоев вызывают окислительный износ рабочей поверхности вала. Как известно, при окислительном износе одновременно протекают два процесса: микропластическая деформация поверхностных слоев и диффузия кислорода в пластически деформированные объемы металла. Окислительный износ в валках развивается особенно интенсивно вследствие пульсирующего контакта трущихся поверхностей.

При прокатке скорость выхода полосы из валков и окружная скорость валков в большинстве случаев не совпадают; в результате наблюдается скольжение между прокатываемым металлом и валком. Особенно значительное скольжение отмечается при прокатке крупносортовых профилей — двутав-

ровых балок, швеллеров, рельсов. Вследствие этого на валках, помимо теплового и окислительного, наблюдается абразивный износ, доля которого в общем износе валков увеличивается при наличии окалины на поверхности прокатываемого металла. При абразивном износе происходят процессы микропластического деформирования и срезания поверхностных слоев металла твердыми абразивными частицами.

В качестве примера на рис. 1.28 показаны профиль и износ рабочих валков клетей

черновой группы листового стана 1680 после прокатки полос шириной 1200—1350 мм. Так как перевалка рабочих валков в черновой группе производилась неодновременно, количество прокатанного металла по клетям разное: в валках 2-й клетки прокатано 11400 т, 3-й — 9400, 4-й — 4450 т. Из приведенных данных видно, что рабочие валки по длине бочки вырабатываются неравномерно. Максимальный износ отмечается по центру бочки валка. Как правило, больше изнашивается верхний рабочий валок, который заваливают в клеть с предварительной выпуклостью. Максимальная выработка, которую удалось замерить на рабочих валках черновой группы, составляет по радиусу 0,6 мм. Аналогично меняется и профиль валков чистовых клетей, однако интенсивность изнашивания здесь значительно меньше.

Таким образом, можно констатировать, что износ рабочих валков, как правило, располагается симметрично относительно оси прокатки на участке, длина которого равна приблизительно ширине прокатываемой полосы. Максимальный износ в направлении радиуса больше у верхних валков, имеющих первоначальную выпуклость. Глубина износа рабочих валков чистовой группы меняется незначительно по ширине изношенной поверхности; ее величина не превышает 0,2 мм.

Профиль и величина износа опорных валков черновых клетей стана 1680 показаны на рис. 1.29. На валках было прокатано 42750 т листа последовательно от ширины 1400 до ширины 710 мм. На основании наблюдений за износом опорных валков стана можно констатировать, что износ отмечается по всей длине бочки, однако максимальная его величина наблюдается в средней части. Максимальная его величина наблюдается радиуса верхних опорных валков, работающих в паре с рабочим валком, имеющим первоначальную выпуклость, больше износа нижних опорных валков. Кроме того, износ валков чистовых клетей больше, чем износ валков черновых клетей.

Анализируя приведенные данные, можно прийти к заключению, что в листовых станах износ рабочих валков на единицу прокатываемого металла в чистовой и черновой группах стана больше, чем опорных. Это объясняется тем, что рабочие валки соприкасаются с горячим прокатываемым металлом, а также тем, что коэффициенты трения больше между раскатом и рабочим валком, чем в кон-

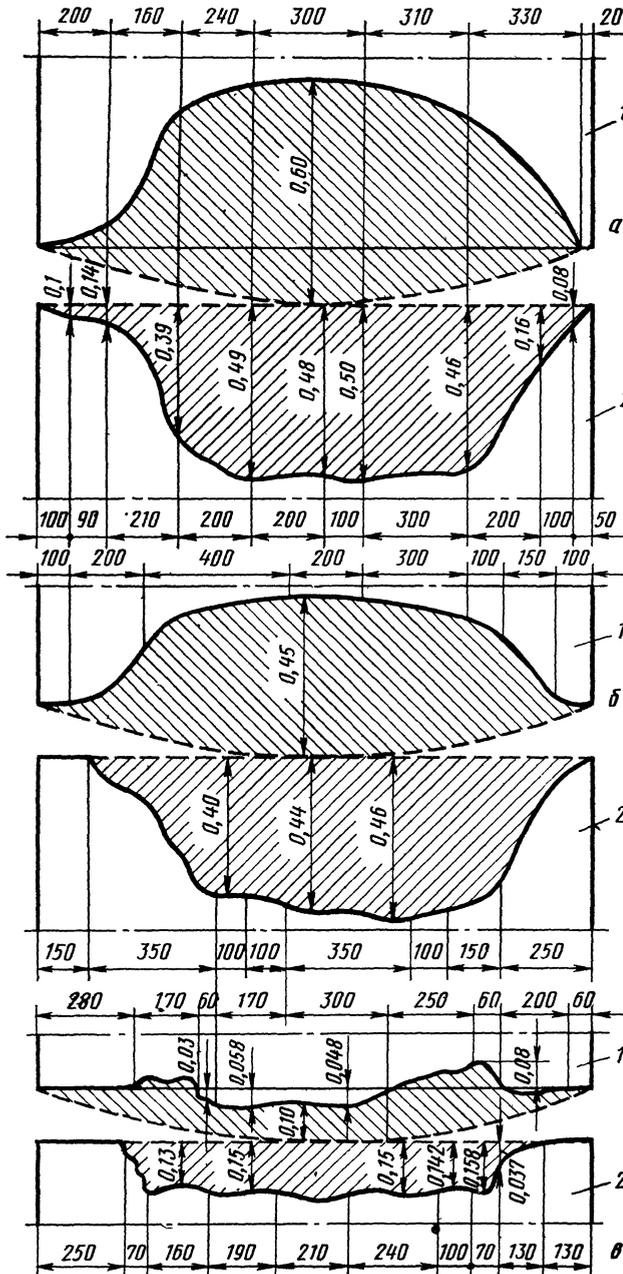


Рис. 1.28. Профиль и износ рабочих валков клетей 2—4 (соответственно а, б, в) черновой группы стана 1680:

1 — верхний валок; 2 — нижний валок

такте рабочего и опорного валков. Кроме того, рабочие валки находятся в контакте значительно дольше, чем опорные валки. Величина износа рабочих и опорных валков определяется главным образом давлением прокатки. Как правило, величина износа валков по клетям следует за изменением давления прокатки.

Важным фактором, определяющим величину износа рабочих валков, является температура прокатываемых полос и длительность контакта полосы с поверхностью валков. Часто наблюдается разгар поверхности

валков. Дефекты валков станов холодной прокатки делят на две группы: дефекты, возникающие при изготовлении, и дефекты, возникающие при эксплуатации. В табл. I.7 указан ряд характерных дефектов, известных из практики изготовления и эксплуатации валков холодной прокатки.

При рассмотрении причин выхода валков станов холодной прокатки из строя анализируют качественное состояние валков, условия, при которых возникают повреждения, и режимы эксплуатации валков на станах.

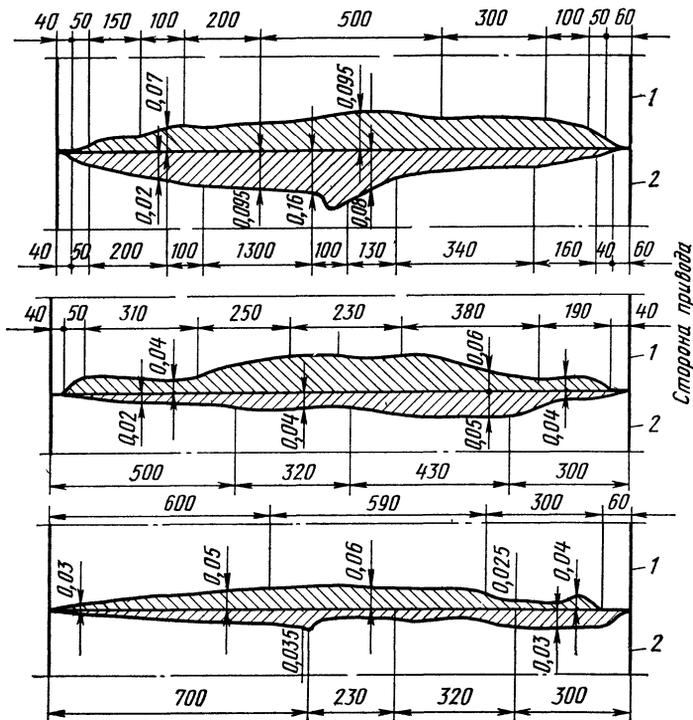


Рис. I.29. Профиль и износ опорных валков черновой группы стана 1680: 1 — верхний валок; 2 — нижний валок

рабочих валков черновой группы и первых двух клетей чистовой группы. Износ рабочих и опорных валков приводит к образованию значительных зазоров между валками и, следовательно, к перераспределению и изменению величины давления в контакте между рабочими и опорными валками.

Характер и величина износа рабочих и опорных валков определяются также жесткостью валковой системы, соотношением диаметров валков, длиной бочки, сортаментом прокатываемых полос, материалом, из которого изготовлены валки, и режимом термической обработки.

Валки станов холодной прокатки. Основными причинами выхода их из строя являются разрушения поверхностного слоя бочки, носящие контактноусталостный характер, и износ. В результате многократных плановых перешлифовок снимается весь закаленный слой валка, твердость его становится недостаточной и валок необходимо за-

менить. Дефекты валков станов холодной прокатки делят на две группы: дефекты, возникающие при изготовлении, и дефекты, возникающие при эксплуатации. В табл. I.7 указан ряд характерных дефектов, известных из практики изготовления и эксплуатации валков холодной прокатки.

При рассмотрении причин выхода валков станов холодной прокатки из строя анализируют качественное состояние валков, условия, при которых возникают повреждения, и режимы эксплуатации валков на станах.

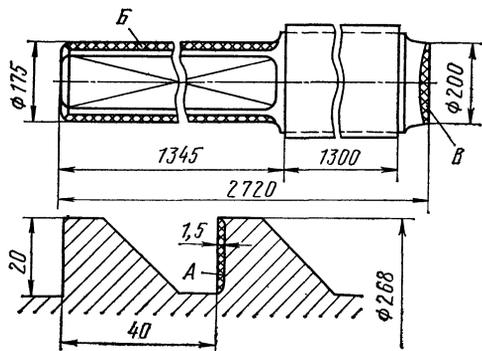


Рис. I.30. Износ винта нажимного устройства блюминга

Т а б л и ц а 1.7

Дефекты и повреждения валков холодной прокатки

Операция, при которой возникают дефекты и повреждения	Виды дефектов и повреждений
Выплавка и разливка Ковка	Неметаллические включения, флокены, пористость, плены, ликвация, раковины
Механическая обработка	Карбидная сетка, раковистый и камневидный излом, крупные блестящие пятна в изломе, дендритная структура, заковы, трещины Кольцевые риски на внутреннем канале, подрезы в местах сопряжений, малый радиус галтелей, смещение осевого канала, несквозной центральной канал, неведенные волосовины и раковины, сетка шлифовочных трещин, несоответствие размеров чертежу
Термическая обработка	Низкая или неравномерная твердость, малая глубина активного слоя, неоднородная структура, повышенная хрупкость, неудовлетворительная микроструктура закаленного слоя (крупноочаговый мартенсит, остаточный аустенит, скопления карбидов и карбидная сетка), большие остаточные напряжения, закалочные трещины, низкая прочность металла у внутреннего канала
Эксплуатация	Поломки, отслоения, выкрошки, трещины, навары, местные отпечатки (порезы, вмятины, вдавлины, «хвосты», «волчки»), выработка бочек, местные перегревы, изгиб (и другие повреждения) шеек и трефов, задиры, забоины, лампасы, износ активного слоя

нию подвержены нажимные винты блюмингов и слябингов. Характер износа нажимного винта одного из блюмингов отечественных заводов представлен на рис. 1.30. Изнашиванию подвержена опорная поверхность профиля *A*, поверхности квадрата хвостовика *B* и торца винта *B*. Износ, как правило, равномерный. Максимальная величина износа опорной поверхности резьбы не превышает 1,0 мм. Износ квадрата и хвостовика может быть несколько больше. В ряде случаев при высоких контактных нагрузках на отдельных участках поверхности резьбы появляются выкрошки. В практике металлургических заводов отмечались случаи шелушения закаленной поверхности опорной резьбы. Это приводило к выходу из строя нажимного устройства и аварийным простоям блюминга.

Шестеренные валки привода прокатных станов. Износ шевронных шестеренных валков, как правило, всегда значителен. Внешний вид изношенного шестеренного валка стана 500 после 11 мес эксплуатации свидетельствует о неравномерности износа. По всей поверхности отмечаются выкрошки. На отдельных участках их глубина достигает более 3 мм. Зубья изношены в основном на уровне начальной окружности, однако значительный износ отмечается и на других участках. Износ наблюдается и на трефах шестеренных валков. Величина износа здесь может достигать 2 мм.

Ножи и диски пил для горячей резки металла. Через небольшой период после начала эксплуатации вершины зубьев дисков пил в результате изнашивания почти полностью срезаются, между зубьями вследствие деформации образуются наплывы. Столь же интенсивно изнашиваются и режущие кромки ножей — острые углы исчезают, величина износа достигает нескольких миллиметров. Износу этих деталей в значительной мере способствуют разгарные трещины, образующиеся в процессе эксплуатации.

Ролики рольгангов и правильные ролики. Условия эксплуатации роликов различных рольгангов неодинаковы. Так, ролики приемного рольганга блюминга и слябинга, помимо изнашивающих нагрузок, испытывают воздействие повышенных температур. Повышенные температуры воздействуют и на ролики рольганга, расположенного перед ножницами, отводящего рольганга у печей. В то же время ролики подводящего рольганга у печей, рольгангов холодильников эксплуатируются при комнатной температуре. Обычно величина износа роликов велика и может достигать 20% диаметра. Износ крайне неравномерен, отмечаются многочисленные выкрошки и выбоины.

Значительно отличаются и условия эксплуатации правильных роликов. Они различны для роликов, правящих листовой металл, балки, швеллеры, уголки, рельсы, шпунты и другие профили. Так, например, у роликов для правки углового металла после определенного периода эксплуатации виден неравномерный характер износа. Рабочая поверхность роликов изнашивается в основном в средней части полка уголка. У вершины уголка износ, как правило, незначительный. Максимальная величина износа в центре полки может достигать 12 мм. Износ бандажа роликов для правки рельсов достигает 3 мм; здесь иногда отмечается выкрашивание поверхностного слоя. В роликах листопрямильной машины изношенная поверхность волнистая; максимальная величина износа (до 5 мм) отмечается в средней части ролика. Износ у торцов практически отсутствует. Износ роликов для правки универсальной полосы по бочке достигает 10 мм на сторону, а по шейке 3 мм. Износ по длине ролика, как правило, неравномерный.

Другое оборудование прокатных станов. К числу деталей, подверженных интенсивному изнашиванию, следует отнести и многие другие детали оборудования прокатных це-

хов, в первую очередь детали слитковоза (ходовые колеса, валы, шестерни), элементы кантователя (валы, шарниры и др.), детали механизма привода вертикальных валков слябинга, многочисленные детали рабочих клетей блюмингов, сортовых, листовых, универсальных, непрерывнозаготовочных и других станов, проводковую арматуру, детали пил, ножниц и правильных машин, разнообразные муфты, валики, ролики, втулки и звенья цепей, эксцентрики, валы и т. д. Износ этих деталей, как правило, неравномерный и колеблется в широких пределах. В ряде случаев изнашивание усугубляется воздействием стационарного и нестационарного тепловых потоков, коррозии и др.

Библиографический список

- Ажогин Ф. Ф.* Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей. М., «Металлургия», 1974. 255 с. с ил.
- Богачев И. Н.* Кавитационное разрушение и кавитационно-стойкие сплавы. М., «Металлургия», 1972. 189 с. с ил.
- Боголюбов Б. Н.* Долговечность землеройных и дорожных машин. М., «Машиностроение», 1964. 224 с. с ил.
- Виноградов Ю. М.* Трение и износ модифицированных металлов. М., «Наука», 1972. 150 с. с ил.
- Вязкость разрушения высокопрочных материалов. Пер. с англ. Под ред. М. Л. Бернштейна. М., «Металлургия», 1973. 298 с. с ил.
- Галега Н. Л., Алябьев А. Я., Шевеля В. В.* Фреттинг-коррозия металлов. Киев, «Техніка», 1974. 296 с. с ил.
- Гаркунов Д. Н., Крагельский И. В., Поляков А. А.* Избирательный перенос в узлах трения. М., «Транспорт», 1969. 103 с. с ил.
- Гордеева Т. А., Жегина И. П., Володина Т. А.* Применение фраттографии для изучения кинетики разрушения сплавов.— «Проблемы прочности», 1971, № 3, с. 25—29 с ил.
- Гордеева Т. А., Жегина И. П.* Методы выявления различных стадий разрушения при повторном нагружении по микрофраттографическим признакам.— «Заводская лаборатория», 1976, т. 42, № 4, с. 464—469 с ил.
- Гордеева Т. А., Жегина И. П.* Анализ изломов при оценке надежности материалов. М., «Машиностроение», 1978. 200 с. с ил.
- Гордеева Т. А., Жегина И. П.* О некоторых особенностях макро- и микростроения изломов.— В кн.: Проблемы разрушения металлов. М., МДНТП, 1975, с. 195—206 с ил.
- Горюнов В. М., Чичинадзе А. В.* Износ металлических материалов при высокоскоростном нестационарном трении.— В кн.: Расчет и испытание фрикционных пар. М., «Машиностроение», 1974, с. 98—102 с ил.
- Гребеник В. М., Цапко В. К.* Надежность металлургического оборудования. Справочник. М., «Металлургия», 1980. 344 с. с ил.
- Демкин Н. Б.* Контактное шероховатых поверхностей. М., «Наука», 1970. 226 с. с ил.
- Долговечность оборудования огнеупорного производства. М., «Металлургия», 1978. 232 с. с ил. Авт.: В. С. Попов, Н. Н. Брыков, Н. С. Дмитриченко и др.
- Екоборн Т.* Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. Пер. с англ. Под ред. В. С. Ивановой. М., «Металлургия», 1971. 263 с. с ил.
- Елизаветин М. А., Сателъ Э. А.* Технологические способы повышения долговечности машин. М., «Машиностроение», 1969. 398 с. с ил.
- Елизаветин М. А.* Повышение надежности машин. М., «Машиностроение», 1973. 430 с. с ил.
- Иванова В. С., Ботвина Л. Р., Маслов Л. И.* Фраттографические особенности усталостных изломов и вязкость разрушения.— В кн.: Усталость и вязкость разрушения металлов. М., «Наука», 1974, с. 79—108 с ил.
- Иванова В. С., Терентьев В. Ф.* Природа усталости металлов. М., «Металлургия», 1975. 456 с. с ил.
- Карпенко Г. В., Василенко И. И.* Коррозионное растрескивание сталей. Киев, «Техніка», 1971. 339 с. с ил.
- Кашеев В. Н.* Абразивное разрушение твердых тел. М., «Наука», 1970. 248 с. с ил.
- Комбалов В. С.* Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. М., «Наука», 1974. 112 с. с ил.
- Костецкий Б. И.* Трение, смазка и износ в машинах. Киев, «Техника», 1970. 395 с. с ил.
- Коцаньда С.* Усталостное разрушение металлов. Пер. с польского. Под ред. В. С. Ивановой. М., «Металлургия», 1976. 455 с. с ил.
- Крагельский И. В.* Трение и износ. М., «Машиностроение», 1968. 479 с. с ил.
- Крагельский И. В., Алисин В. В.* Расчетный метод оценки трения и износа— эффективный путь повышения надежности и долговечности машин. М., «Знание», 1976. 55 с. с ил.
- Крагельский И. В., Добычин М. И., Комбалов В. С.* Основы расчетов на трение и износ. М., «Машиностроение», 1977. 355 с. с ил.
- Кудрявцев И. В.* Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении. М., Машгиз, 1951. 278 с. с ил.
- Кудрявцев П. И.* Остаточные сварочные напряжения и прочность соединений. М., «Машиностроение», 1964. 95 с. с ил.
- Ларионов В. П., Ковальчук В. А.* Хладостойкость и износ деталей машин и сварных соединений. Новосибирск, Сибирское отделение изд-ва «Наука», 1976. 206 с. с ил.
- Левина Э. М., Решетов Д. Н.* Контактная жесткость машин. М., «Машиностроение», 1971. 264 с. с ил.
- Любарский И. М., Палатник Л. С.* Металлофизика трения. М., «Металлургия», 1976. 176 с. с ил.
- Максак В. И.* Предварительное смещение

ние и жесткость металлического контакта. М., «Наука», 1975. 76 с. с ил.

Методы повышения долговечности деталей машин. М., «Машиностроение», 1971. 272 с. с ил. Авт.: В. Н. Ткачев, Б. Н. Фиштейн, В. Д. Власенко, В. А. Уланов.

Михин Н. М. Внешнее трение твердых тел. М., «Наука», 1977. 221 с. с ил.

Моталин А. А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. Киев, «Техніка», 1971. 144 с. с ил.

Надежность и долговечность машин. Киев, «Техніка», 1975. 273 с. с ил. Авт.: Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, Л. И. Бернадский и др.

Новые методы оценки сопротивления материалов хрупкому разрушению. Пер. с англ. Под ред. Ю. Н. Работнова. М., «Мир», 1972. 439 с. с ил.

Олейник Л. В. Выносливость деталей машин. Киев, «Техніка», 1978. 214 с. с ил.

Павлов В. Г., Дроздов Ю. Н. Повышение долговечности узлов сухого трения. — «Вестник машиностроения», 1975, № 11, с. 34—37.

Петухов А. Н. Усталостная прочность материалов и элементов конструкций ГТД в условиях контактной коррозии трения. — «Проблемы прочности», 1972, № 2, с. 99—103.

Петухов А. Н. Методические особенности исследования процесса фреттинг-коррозии в связи с усталостью материала. — «Заводская лаборатория», 1974, т. 40, № 10, с. 1246—1250 с ил.

Потак Я. М. Высокопрочные стали. М., «Металлургия», 1972. 208 с. с ил.

Проников А. С. Надежность машин. М., «Машиностроение», 1978. 592 с. с ил.

Разрушение. Т. I. Микроскопические и макроскопические основы механики разрушения. Пер. с англ. Под ред. А. Ю. Ишлинского. М., «Мир», 1973. 418 с. с ил.

Разрушение. Т. 4. Разрушение металлов. Пер. с англ. Под ред. М. Л. Бернштейна. М., «Металлургия», 1976. 496 с. с ил.

Романив О. Н., Зима Ю. В., Карпенко Г. В. Электронная фрактография упроченных сталей. (на укр. языке). Киев, «Наукова думка», 1974. 206 с. с ил.

Семенов А. П., Савинский Ю. Э. Металло-фторопластовые подшипники. М., «Машиностроение», 1976. 192 с. с ил.

Семенов А. П. Схватывание металлов. М., «Машгиз», 1958. 280 с. с ил.

Серенсен С. В. Сопротивление металлов усталостному и хрупкому разрушению. М., Атомиздат, 1975. 191 с. с ил.

Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. Киев, «Наукова думка», 1979. 188 с. с ил. Авт.: Е. Л. Шведко, Д. Я. Ровинский, В. Д. Зозуля, Э. Д. Браун.

Сорокин Г. М. Влияние механических характеристик стали на ее абразивную износостойкость. — «Вестник машиностроения», 1975, № 5, с. 35—38 с ил.

Тененбаум М. М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин. М., «Машиностроение», 1966. 331 с. с ил.

Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию. М., «Машиностроение», 1975. 271 с. с ил.

Ткачев В. Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. М., «Машиностроение», 1971. 264 с. с ил.

Трение, изнашивание и смазка. Справочник, кн. 2. Под ред. И. В. Крагельского и В. В. Алисина. М., «Машиностроение», 1978. 400 с. с ил.

Тылкин М. А. Прочность и износостойкость деталей металлургического оборудования. М., «Металлургия», 1965. 347 с. с ил.

Тылкин М. А. Повышение долговечности деталей металлургического оборудования. М., «Металлургия», 1971. 608 с. с ил.

Усталость и хрупкость металлических материалов. М., «Наука», 1968. 215 с. с ил. Авт.: В. С. Иванова, С. Е. Гуревич, И. М. Кошьеv и др.

Финкель В. М. Физика разрушения. М., «Металлургия», 1970. 376 с. с ил.

Фридман Я. В., Гордеева Т. А., Зайцев А. М. Строение и анализ изломов металлов. М., Машгиз. 1960. 128 с. с ил.

Хрущов М. М., Бабичев М. А. Абразивное изнашивание. М., «Наука», 1970. 252 с. с ил.

Хрущов М. М., Бабичев М. А. Исследование изнашивания металлов. М., изд. АН СССР, 1960. 351 с. с ил.

Цесник Л. С. Механика и микрофизика истирания поверхности. М., «Машиностроение», 1979. 264 с. с ил.

Чичинадзе А. В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении. М., «Наука», 1967. 215 с. с ил.

Ямпольский Г. Я., Крагельский И. В. Исследование абразивного износа элементов пар трения качения. М., «Наука», 1973. 63 с. с ил.

Ясь Д. С., Подмоков В. В., Диденко Н. С. Испытания на трение и износ. Киев, «Техніка», 1971. 148 с. с ил.

Глава II

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ СТАЛИ

1. Макроскопический анализ

Назначение

Макроанализ состоит в изучении строения металла путем осмотра его излома

или поверхности, специально подготовленной для этой цели, невооруженным глазом или через лупу при малых увеличениях (≤ 30). Это позволяет наблюдать одновременно значительную часть поверхности и получить сведения об общем строении ме-