

Новосибирский государственный технический университет

А.В. Плохов, А.И. Попелюх, Н.В. Плотникова

Физические и механические свойства материалов

Часть 1. Теоретическая

Новосибирск 2017

Учебно-методический комплекс состоит из базового курса дисциплины «Физические и механические свойства материалов» и практической лабораторной части. Рассмотрены стандартные методы оценки физических и механических свойств, а так же новые способы исследования параметров конструктивной прочности материалов. Результаты научных исследований сопровождаются чертежами образцов для испытаний и схемами лабораторных установок. Во второй практической части рассмотрены основы составления управляющих программ для испытательных комплексов «Instron», изложены методические рекомендации по проведению испытаний и определению механических свойств материалов и изделий. Учебно-методический комплекс позволит студенту научиться определять физико-механические свойства; ставить задачи и составлять программы комплексных исследований; использовать полученные результаты для оценки качества материалов и изделий, а также для моделирования и оптимизации технологических процессов.

Рекомендуется для студентов машиностроительных и авиационных специальностей технических университетов и инженерно-технических работников, занятых испытаниями материалов машиностроительного назначения.

Оглавление

Предисловие

Введение

Глава 1. Дефекты кристаллической структуры металлов.

Физические и структурные модели пластической деформации и разрушения материалов.

1.1. Дефекты реальной структуры

1.2. Макродефекты

1.3. Микродефекты

1.3.1. Точечные дефекты

1.3.2. Линейные дефекты – дислокации

1.4. Мезодефекты

1.5. Структурные модели пластической деформации и разрушения материалов

1.5.1. Понятие о физической мезомеханике материалов

1.5.2. Структурные модели разрушения материалов.

1.5.3. Виды разрушения. Хрупкое и вязкое разрушения

1.5.4. Пути преодоления противоречия между повышением предела текучести и трещиностойкостью

Список вопросов для самопроверки

Список литературы

Глава 2. Физические свойства

2.1. Плотность

2.2.1. Понятия и определения

2.2.2. Метод гидростатического взвешивания

- 2.2.3. Пикнометрический метод
- 2.2. Пористость
 - 2.2.1. Понятия и определения
 - 2.2.2. Общая характеристика методов измерения пористости
 - 2.2.3. Метод гидростатического взвешивания
 - 2.2.4. Микроскопические количественные методы
 - 2.2.5. Ртутная порометрия
 - 2.2.6. Метод вытеснения
 - 2.2.7. Определение пористости по методу восстановленного отпечатка
 - 2.2.8. Коррозионные методы
- 2.3. Коэффициент проницаемости
 - 2.3.1. Понятия и определения
 - 2.3.2. Образцы, оборудование, испытания
- 2.4. Электрическая прочность
 - 2.4.1. Понятия и определения
 - 2.4.2. Образцы, оборудование, испытания
- 2.5. Удельные объемное и поверхностное сопротивления
 - 2.5.1. Понятия и определения
 - 2.5.2. Сверхпроводимость
 - 2.5.3. Образцы, оборудование, испытания
- 2.6. Теплопроводность
 - 2.6.1. Понятия и определения
 - 2.6.2. Образцы, оборудование, испытания
- 2.7. Температурный коэффициент линейного расширения
 - 2.7.1. Понятия и определения
 - 2.7.2. Образцы, оборудование, испытания
- 2.8. Магнитные свойства
 - 2.8.1. Понятия и определения

- 2.8.2. Магнитная индукция и магнитная проницаемость
- 2.8.3. Магнитные материалы и их применение
- 2.8.4. Стандартные методы испытаний магнитных материалов

Список вопросов для самопроверки

Список литературы

Глава 3. Механические свойства при статических и динамических испытаниях материалов

3.1. Упругость

- 3.1.1. Понятия и определения
- 3.1.2. Определение модуля упругости при изгибе
- 3.1.3. Определение модуля упругости динамическим методом
- 3.1.4. Другие методы определения характеристик упругости

3.2. Прочность, пластичность

- 3.2.1. Статические испытания на растяжение
- 3.2.2. Прочность порошковых и керамических материалов
- 3.2.3. Сверхпластичность материалов
- 3.2.4. Статические испытания на сжатие и кручение

3.3. Внутреннее трение

- 3.3.1. Понятия и определения
- 3.3.2. Дислокационная модель Гранато-Люкке

3.4. Твердость

- 3.4.1. Понятия и определения
- 3.4.2. Измерение твердости по Бринеллю
- 3.4.3. Измерение твердости по Роквеллу
- 3.4.4. Измерение твердости по Виккерсу
- 3.4.5. Измерение микротвердости
- 3.4.6. Наноиндентирование

3.5. Ударная вязкость

- 3.5.1. Понятия и определения

3.5.2. Образцы, оборудование, испытания

Список литературы

Список вопросов для самопроверки

Глава 4 . Износостойкость и испытания на изнашивание

4.1. Термины и определения

4.2. Актуальные направления повышения износостойкости

4.3. Абразивное изнашивание

4.3.1. Понятия и определения

4.3.2. Изнашивание закрепленными и незакрепленными абразивными частицами

4.3.3. Газоабразивное изнашивание

4.3.4. Гидроабразивное изнашивание. Кавитация

4.3.5. Ударно-абразивное изнашивание

4.3.6. Изнашивание абразивно-масляной прослойкой (абразивной суспензией)

4.4. Изнашивание в парах трения

4.4.1. Факторы, определяющие процессы трения и изнашивания

4.4.2. Выбор метода испытаний

4.4.3. Машины трения

4.4.4. Анализ поверхностей трения

4.4.5. Оценка фрикционной совместимости

4.5. Фреттинг-коррозия

4.5.1. Понятия и определения

4.5.2. Образцы, оборудование, испытания

4.6. Истирающая способность

4.7. Измерение износа

Список вопросов для самопроверки

Список литературы

Глава 5. Усталость и усталостные испытания

5.1. Много- и малоцикловая усталость

5.1.1. Понятия и определения

5.1.2. Факторы, влияющие на усталостную прочность материалов

5.1.3. Образцы, оборудование, испытания

5.2. Контактная усталость

5.2.1. Понятия и определения

5.2.2. Образцы, оборудование, испытания

5.3. Малоцикловая усталость: термическая и при термомеханическом нагружении

5.3.1. Понятия и определения

5.3.2. Малоцикловая термическая усталость

5.3.3. Усталость при термомеханическом нагружении

5.4. Ударно-циклическая усталость

Список вопросов для самопроверки

Список литературы

Глава 6. Трещиностойкость

6.1. Общие сведения о трещиностойкости.

6.2. Статическая трещиностойкость

6.3. Циклическая трещиностойкость

6.4. Ударно-циклическая трещиностойкость

Список вопросов для самопроверки

Список литературы

Глава 7. Жаропрочность

7.1. Жаропрочные материалы

7.2. Испытания на ползучесть

7.2.1. Понятия и определения

7.2.2. Образцы, оборудование, испытания

7.3. Испытания на длительную прочность

7.4. Испытания на релаксацию напряжений

Список вопросов для самопроверки

Список литературы

Глава 8. Защитные свойства

8.1. Жаростойкость

8.1.1. Понятия и определения

8.1.2. Образцы, оборудование, испытания

8.2. Коррозионная стойкость

8.2.1. Понятия и определения

8.2.2. Образцы, оборудование, испытания

Список вопросов для самопроверки

Список литературы

Глава 9. Технологические испытания

9.1. Лист и лента

9.2. Проволока

9.3. Трубы

9.4. Испытания на осадку и изгиб проката

Список вопросов для самопроверки

Заключение

Список литературы

Приложение

Список основных ГОСТ по определению физических и механических свойств

Предисловие

Рост конструктивной прочности - один из наиболее эффективных путей обеспечения надежности и долговечности деталей машин. Поэтому введение в учебный процесс ряда машиностроительных специальностей изучения физических и механических свойств металлических и керамических материалов необходимо и своевременно. Важность проблемы повышения конструктивной прочности особенно возрастает с усилением требований к надежности и долговечности изделий и постоянным увеличением напряженности цикла их эксплуатации.

В последние годы были пересмотрены учебные планы и рабочие программы всех специальностей, в т. ч. и машиностроительных. В последние годы были достигнуты значительные успехи в развитии структурной теории конструктивной прочности, физической мезомеханики материалов, сверхпластичности, изучении керамических материалов. Поэтому возникла потребность в учебнике, в котором были бы учтены требования новых учебных планов и программ, а также рассмотрены последние теории деформации и разрушения и положения физической мезомеханики материалов.

Дисциплина «Физические и механические свойства материалов» является базовой при обучении бакалавров по направлению «Материаловедение и технологии материалов», а также дисциплиной по выбору при обучении магистров направления «Материаловедение и технологии материалов». Содержание дисциплины определяется требованиями (компетенциями) Государственного стандарта к результатам освоения образовательной программы. Дисциплина «Физические и механические свойства материалов» обеспечивает следующие компетенции:

- готовность применять фундаментальные математические, естественнонаучные и общетехнические знания в профессиональной деятельности;
- способность сочетать теорию и практику для решения инженерных задач;
- способность оценивать качество материалов в производственных условиях на стадии опытно-промышленных испытаний и внедрения;
- способность использовать нормативные и методические материалы для подготовки и оформления технических заданий на выполнение измерений, испытаний, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Содержание предлагаемого учебно-методического комплекса (УМК) основывается на знаниях студентами предшествующих дисциплин "Физика", "Математика", "Вычислительная техника и программирование", "Основы научных исследований" и создает задел для изучения последующей дисциплины "Научные основы выбора материалов и технологий в машиностроении". К особенностям публикации относится то, что в ней изложены способы оценки малоисследованных, но важных для материаловедов свойств, в частности, пористости, газопроницаемости, трещиностойкости, износостойкости в условиях газо-, ударно- и гидроабразивного воздействия.

Авторами рассмотрена взаимосвязь структуры материалов с физическими явлениями на микро-, мезо- и макроуровне, а также методы исследования и контроля качества металлических и керамических материалов. Вошедший в УМК фактический материал в значительной степени основывается на экспериментальных результатах, полученных на кафедре « Материаловедение в машиностроении» НГТУ при проведении научных исследований. Авторы ознакомились с большим количеством

отечественных и зарубежных научных источников и немногочисленной имеющейся учебной литературой и после критического анализа использовали данные в своей работе.

В УМК рассматриваются не только стандартные методы оценки физических и механических свойств. Приведены новые методы исследования параметров конструктивной прочности материалов. Результаты научных исследований сопровождаются чертежами образцов для испытаний и схемами лабораторных установок.

После изучения УМК студенты будут уметь определять физико-механические свойства; ставить задачи и составлять программы комплексных исследований материалов; использовать результаты определения свойств для оценки качества материалов и изделий, а также для моделирования и оптимизации технологических процессов. Методически комплекс написан так, что может быть эффективно использован студентами при самостоятельной работе. Комплекс содержит данные для выполнения РГЗ, курсовых и дипломных работ, а также даёт общие представления о выборе технологий упрочнения деталей машин, исходя из условий их эксплуатации и физико - механических свойств.

Авторы выражают благодарность проф. А.А. Батаеву и коллективу кафедры «Материаловедение в машиностроении» НГТУ за ценные замечания, позволившие улучшить качество публикации.

Введение

Одним из факторов, сдерживающих распространение инновационных упрочняющих технологий в отечественном машиностроении, является недостаточное развитие специальных методов оценки структуры и свойств материалов. Оптимизация технологических процессов зависит от улучшения старых и разработки новых методов оценки конструктивной прочности. Под понятием ‘конструктивная прочность’ понимают комплекс тех характеристик, которые находятся в наибольшей корреляции с эксплуатационными свойствами изделия. Понятие “ конструктивная прочность” было предложено Я. Р. Раузиным и Е. А. Шуром в 80-х годах прошлого века и в дальнейшем получило развитие в работах Л. И. Тушинского и А. А. Батаева с сотр. Проблема повышения конструктивной прочности для машиностроительных материалов является важнейшей, и именно решению этой проблемы способствует внедрение в промышленность новых прогрессивных технологий. Конструктивная прочность современного материала может включать в себя многие показатели (характеристики). Рациональный, обоснованный выбор показателей конструктивной прочности является актуальной задачей, а её решение представляет большой интерес. Исследования материалов выделены в самостоятельную экспериментальную область определения физических и механических свойств. Это позволяет в известной мере прогнозировать поведение изделий при реальных условиях эксплуатации.

Комплексное изучение современной технологии (материала) базируется на взаимосвязи структуры и конструктивной прочности. Поэтому методы исследования структуры и свойств должны рассматриваться в неразрывной связи: новая технология (материал) – анализ структуры – изучение физических и механических свойств – совершенствование технологии (материала) – анализ полученной структуры—изучение физических и

механических свойств и т.д. Структурный анализ материала должен всегда дополняться и подтверждаться данными изучения свойств, что, в свою очередь, позволяет обновить технологию (материал) и вывести ее (его) на очередной виток развития (рис.).

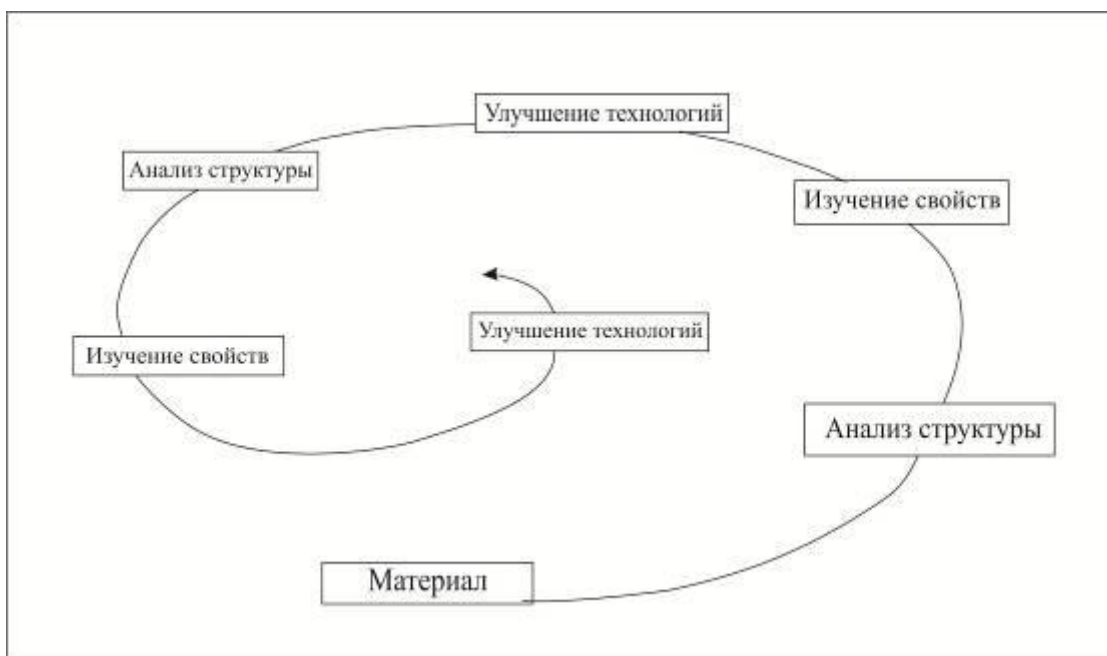


Рис. – Схема комплексного изучения современной технологии (материала)

Технологии упрочнения рассмотрены студентами ранее в дисциплинах ‘Материаловедение’ и ‘Термическая и химико-термическая обработка материалов’. Структурный анализ изучался в дисциплине ‘Методы исследования материалов’. В предлагаемой книге рассматривается последнее звено -- изучение физических и механических свойств материалов. Разрыв в данной цепочке приведет к образованию безвыходного круга в развитии инновационной технологии.

Общим требованием при выборе методов испытаний является минимальное, но достаточное их (методов) количество, выяснение весомости и приоритета каждого. Полученные результаты зависят от выбора метода исследований, количества, геометрии и размеров образцов, тщательности

подготовки к испытаниям, применяемой аппаратуры, условий испытаний, математической обработки результатов. Достоверные результаты испытаний материалов могут быть получены лишь при единообразии и сравнимости испытаний. Основной целью исследований структуры и свойств современного материала следует считать целенаправленное получение конкретного изделия с необходимой конструктивной прочностью.

Теоретическая часть учебно-методического комплекса состоит из девяти глав, введения, заключения, приложения и контрольных вопросов, отвечающих требованиям государственного стандарта.

В первой главе приведена современная классификация структур машиностроительных материалов, дефектов кристаллического строения. Показана связь структуры со свойствами материала на микро-, мезо-, и макроуровнях. Кратко рассматриваются положения теории дислокаций. Приведены основные положения структурной теории конструктивной прочности и физической мезомеханики материалов. Проанализированы структурные модели пластической деформации и разрушения материалов.

Во второй главе рассмотрены физические свойства металлических и керамических материалов в зависимости от химического состава и структуры. Основное внимание уделено пористости, теплопроводности и температурному коэффициенту линейного расширения, как характеристикам наиболее важным для машиностроителей. Приведены стандартные и оригинальные методы испытаний.

Третью главу составляют методы оценки упругих, прочностных и вязких свойств. Подробно рассмотрены способы определения характеристик упругости, пределов прочности, текучести, пропорциональности, показателей пластичности, твердости при различных схемах нагружения. В последнем методе вскрыты возможности наноиндентирования.

В четвертой главе анализируются различные случаи изнашивания поверхности деталей машин в зависимости от их функционального назначения. Для каждого случая изнашивания даны схемы и методики проведения испытаний, а также чертежи образцов и отдельных узлов испытательных машин. Обозначены проблемы износостойкости упрочненных материалов, вскрыты зависимости скорости и интенсивности изнашивания от механических свойств.

В пятой главе на дислокационном уровне с привлечением теоретических аспектов механики разрушения рассмотрены основные события, происходящие в материале при циклическом нагружении. Отмечены особенности разрушения при контактной, термической, термомеханической и ударно-циклической усталости. С современных позиций оценена особая роль упрочненной поверхности в конструктивной прочности изделий при различных усталостных разрушениях.

Шестая глава посвящена группе методов исследования трещиностойкости материалов. Показана целесообразность использования методик по оценке трещиностойкости низкопрочных, пластичных материалов. Даются необходимые практические рекомендации для постановки этих сложных способов испытаний.

В седьмой главе показано влияние структуры на высокотемпературную деформацию жаропрочных материалов. Рассмотрено влияние легирования и дислокационных построений на пределы ползучести и длительной прочности.

Восьмая глава содержит сведения о защитных свойствах материалов: жаростойкости и коррозионной стойкости. Приведены современные методы исследования этих важных характеристик, показаны пути повышения

конструктивной прочности материалов при работе в коррозионных средах и при высокой температуре.

Последнюю девятую главу составляют технологические испытания— достаточно простые способы оценки пригодности изделий и материалов для применения в конкретной технологической операции.

В практической части рассмотрены основы составления управляющих программ для испытательных комплексов «Instron», изложены методические рекомендации по проведению испытаний и определению механических свойств материалов и изделий.

Глава 1. Дефекты кристаллической структуры металлов. Физические и структурные модели пластической деформации и разрушения материалов*

1.1. Дефекты реальной структуры

В соответствии с общей классификацией материалов Л. И. Тушинского (рис. 1), все дефекты можно разделить на три основные группы:

- макродефекты — дефекты макрообъемов, целых изделий, изучаемые невооруженным глазом или на световых микроскопах;
- мезодефекты — дефекты внутреннего строения зерен, изучаемые с помощью электронных микроскопов;

- микродефекты – дефекты строения кристаллических решеток, изучаемые с помощью рентгеноструктурного анализа, автоионного и туннельного микроскопов.

В последнее время появились новые представления о классификации структур, которые предусматривают также три основные группы (см. рис. 1.1, нижний ряд):

- макроструктура (вид излома, дендритное и полиэдрическое строение, размеры зерен и их ориентация);
- мезоструктура (структура внутри зерен, дислокации и их ансамбли, дисклинации, ячейки, полигоны);
- микроструктура (точечные дефекты, размеры и тип кристаллических решеток).

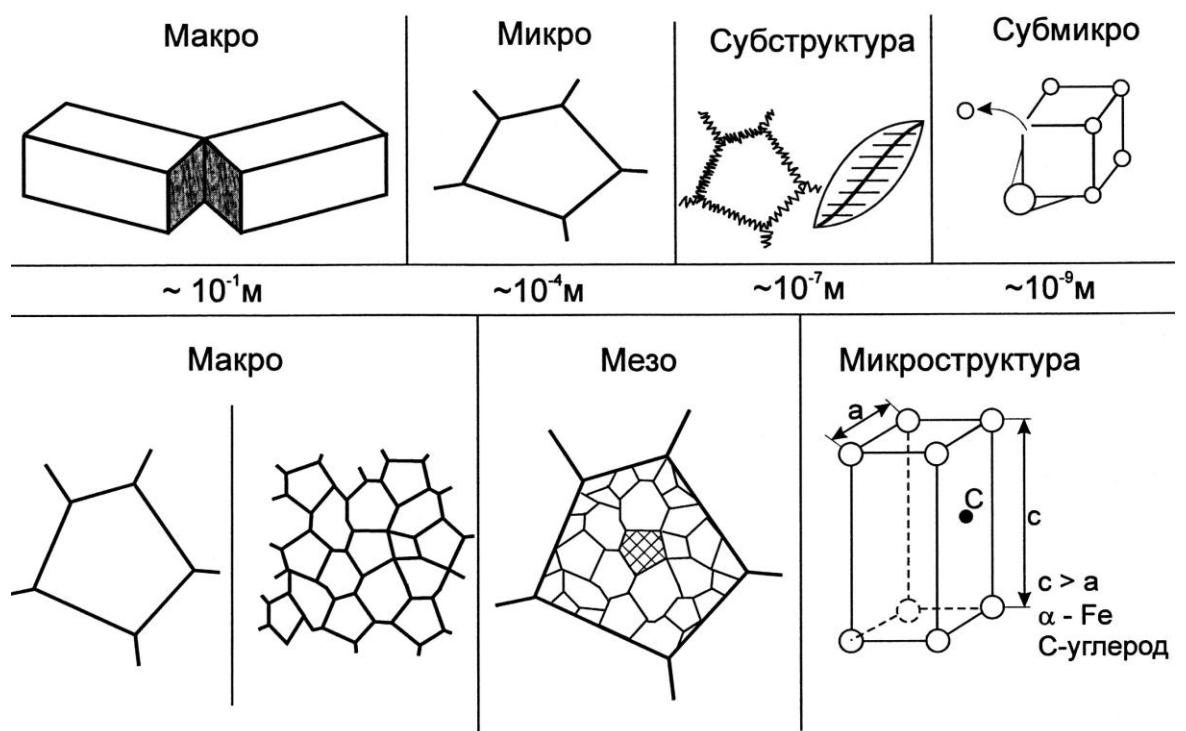


Рисунок 1.1 - Иерархия структур материалов: верхний ряд – традиционная классификация; нижний ряд – новый подход (интеграция физики, механики, материаловедения).

*Глава написана на основе публикаций Л.И. Тушинского и И.И. Новикова.

1.2. Макродефекты

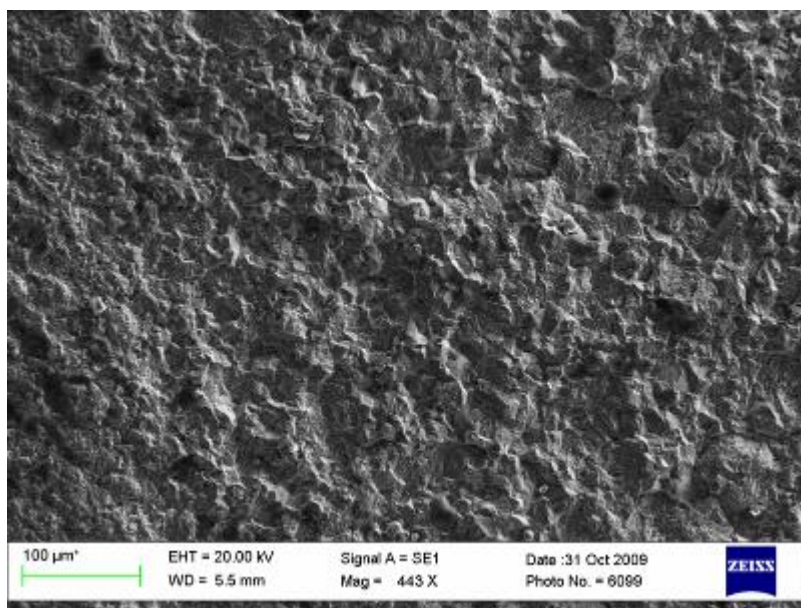
К макродефектам относят:

- неправильную (несимметричную) форму зерен и их границ в полиэдрической структуре;
- дендритную форму кристаллов, образующихся при кристаллизации из жидкости;
- различные неметаллические включения, их форма, химический состав и размеры;
- микро- и макротрещины, поры;
- форму, размеры и распределение структурных составляющих в объеме многофазных сплавов.

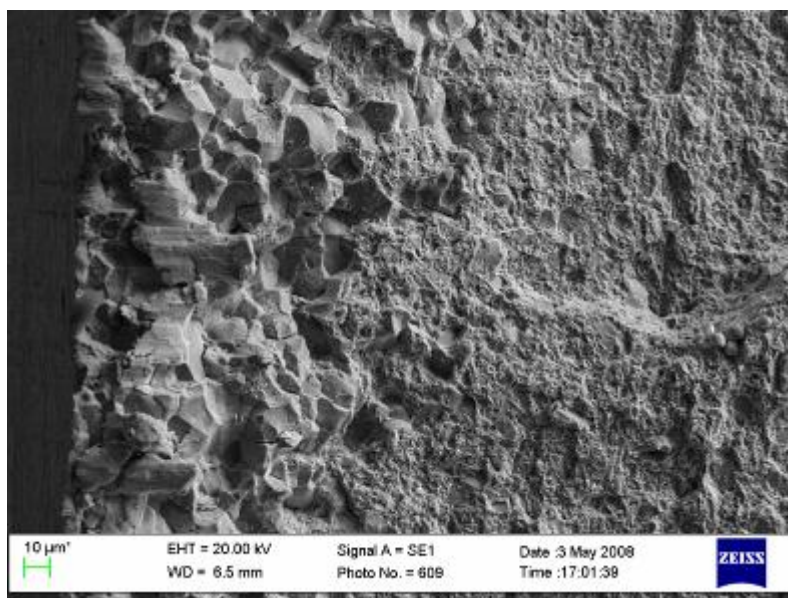
Типичным примером макродефектов структуры служит дендритная структура, возникающая из жидкости при первичной кристаллизации.

Большая роль в создании комплекса физико-механических свойств металлических сплавов принадлежит неметаллическим включениям, остающимся в сплаве после завершения металлургического цикла. Специальные методы обработки жидкого сплава, например вакуумирование, промывка синтетическими шлаками, модифицирование и другие, уменьшают количество и меняют формы и размеры неметаллических включений. Во всех случаях крупные неметаллические включения в стали снижают ее конструктивную прочность.

К макродефектам относят вид поверхности излома образца. Визуальное изучение поверхности излома какой-либо детали машины или конструкции (рис. 1.2), разрушенных в процессе эксплуатации часто позволяет вскрыть причину аварии.



а



б

Рисунок 1.2 – Макроструктура поверхности излома стали 40: а – крупнозернистой, перегретой при термической обработки; б – мелкозернистой, после термообработки по оптимальным режимам.

Много полезной информации о распределении серы в объеме железнодорожного рельса Р65 дает отпечаток по Бауману (рис. 1.3).

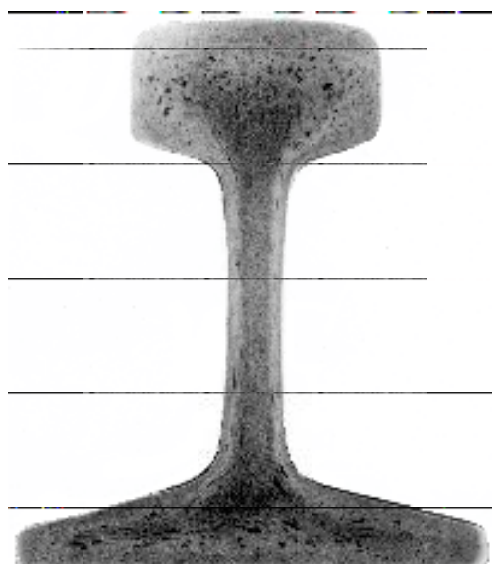


Рисунок 1.3 – Отпечаток по Бауману. Пятнистая ликвация серы в стали М75.

Большое количество макродефектов сопровождает электродуговую сварку. Зона сварного шва обычно имеет типичную литую структуру с дендритными кристаллами (рис. 1.4), причем, между свариваемыми листами может возникнуть опасная макротрещина.

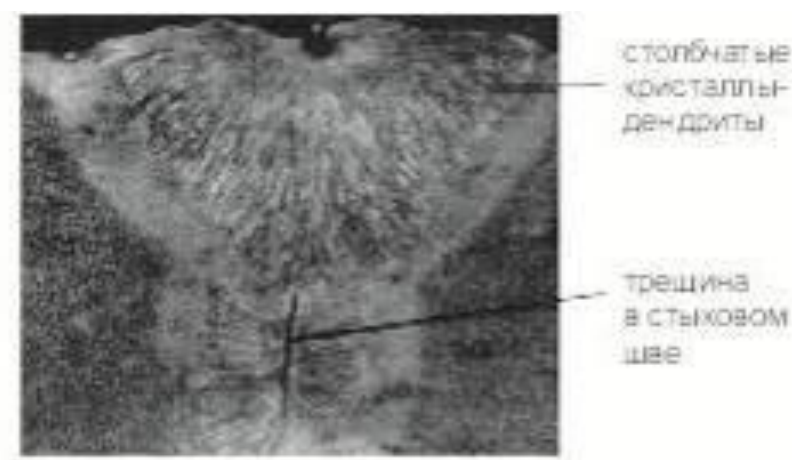


Рисунок 1.4 – Макроструктура сварного шва

К основным микродефектам структуры относят точечные и линейные дефекты (рис. 1.6).

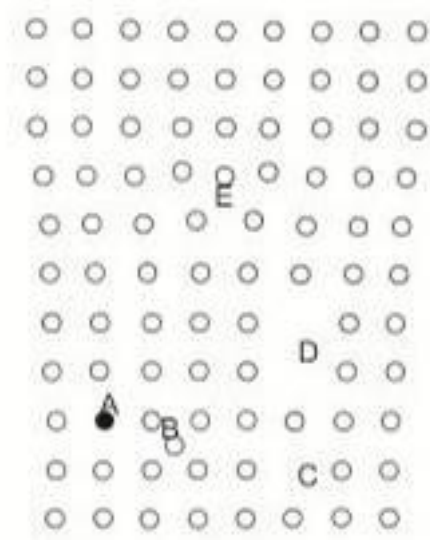


Рисунок 1.6 – Схема основных дефектов кристаллической решетки реального материала: А – атом примеси; В – межузельный атом; С – вакансия; D – дивакансия; E – краевая дислокация.

1.3.1. Точечные дефекты

Единичные точечные дефекты всегда присутствуют в кристаллической решетке. В этом смысле понятие об идеальной (бездефектной) решетке является просто моделью, удобной для рассмотрения геометрии построения и основных свойств кристаллических твердых тел.

Точечные дефекты возникают в материале в процессе его обработки при:

- первичной кристаллизации из жидкости;
- вторичной перекристаллизации в твердом состоянии при полиморфных и фазовых превращениях;
- пластической деформации;
- термической обработке;
- радиационном облучении.

Частицы высоких энергий, например, нейтроны выбивают ионы из узлов кристаллической решетки и образуют целый каскад дефектов, влияя на физико-механические характеристики материала.

Отсутствие атома в узле кристаллической решетки (вакансия) представляет собой наиболее простой и вместе с тем один из наиболее важных дефектов ее строения (рис. 1.7, а). Атом, вклинившийся между узлами кристаллической решетки, – межузельный атом – другой ее точечный дефект (рис. 1.58, б). Атомы примесей в вакансионном или межузельном положении также являются точечными дефектами кристалла (рис. 1.58, в).

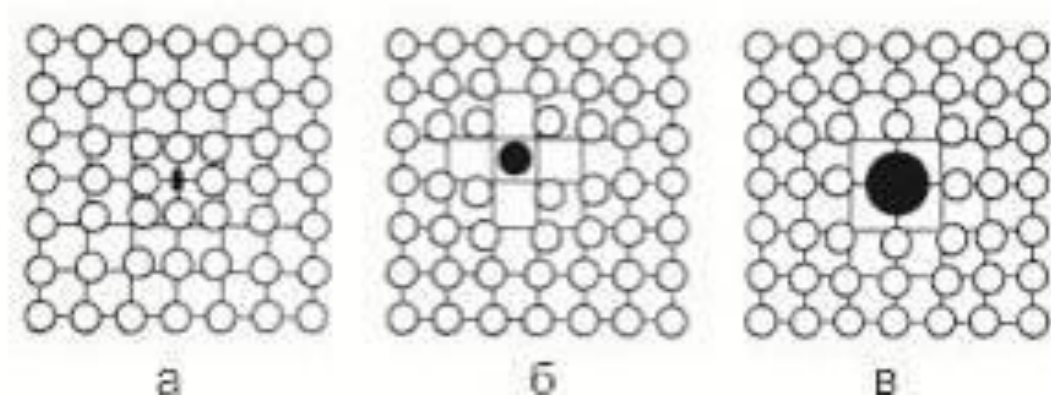


Рисунок 1.7 – Схемы точечных дефектов в простой кубической решетке: а – вакансия; б – межузельный атом; в – атом примеси в вакансионном положении.

Важным параметром точечных дефектов является энергия их образования. Она, в принципе, равна изменению энергии кристаллической решетки в результате переноса иона из объема металла на его поверхность (случай образования вакансии) или с поверхности в объем (образование межузельного атома). Энергия образования для вакансий составляет примерно 1 эВ, для межузельных атомов она в два-три раза выше.

Межузельные атомы и вакансии, подобно разноименным электрическим зарядам, обладают многими взаимно противоположными свойствами. Объединение межузельного атома и вакансии приводит к исчезновению этих двух парных дефектов - они аннигилируют. Собственный

межузельный атом и вакансию удобно рассматривать совместно во многих случаях; отсюда и термин – пара Френкеля, или парные дефекты по Френкелю (рис. 1.8). Движение единичных вакансий осуществляется за счет простого перехода (перескока) ближнего к вакансии атома на ее место; освободившийся узел решетки соответствует новому положению вакансии, т.е. вакансия передвинулась на одно межатомное расстояние.

Присутствие в кристаллической решетке точечных дефектов обуславливает ее заметное искажение: окружающие их соседние атомы смещаются из своих нормальных положений в направлении дефекта (положительные смещения) или от него (отрицательные смещения).

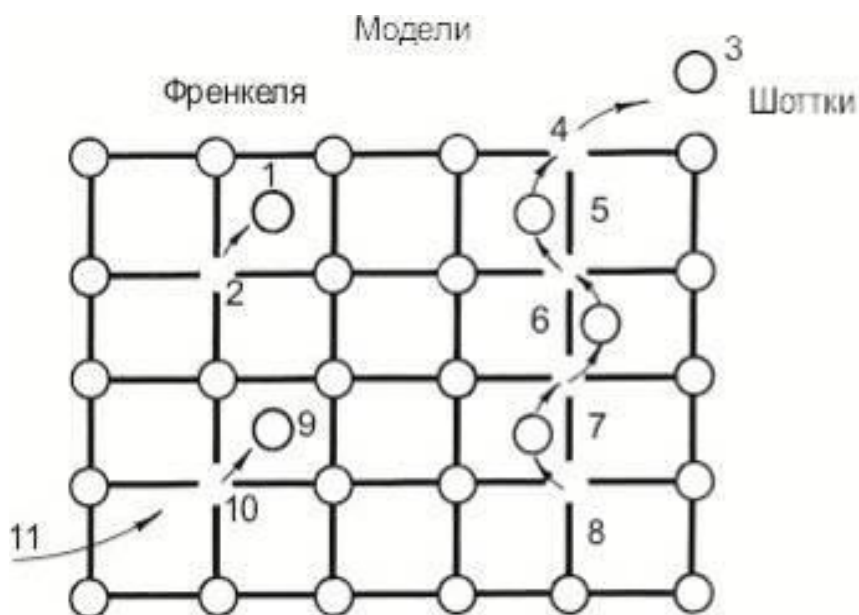


Рисунок 1.8 – Модели Френкеля и Шоттки, объясняющие геометрию точечных дефектов и их перемещение: 1,9 – смещенные атомы после внешнего воздействия 11; 2,10 – вакансии, образующие со смещенными атомами 1 и 9 пары Френкеля; 3 – атом, покинувший поверхность; 4-8 – переход атомов на поверхность и соответствующее перемещение вакансии вглубь металла.

Приближенные цифровые значения, касающиеся геометрии точечных дефектов и их перемещения, были получены теоретическими расчетами. Экспериментальное определение параметров, характеризующих точечные дефекты, представляет весьма сложную задачу, результаты которой являются зачастую дискуссионными, неоднозначными.

Присутствие точечных дефектов в различной степени отражается на физических и механических свойствах. Для изучения влияния точечных дефектов на конструктивную прочность исследовали материалы в диапазоне от самых малых измеряемых деформаций и вплоть до механического разрушения.

1.3.2. Линейные дефекты– дислокации

Практически не осталось областей исследования свойств кристаллических материалов, в которых бы не применяли теорию дислокаций. Движением дислокаций объясняется пластическая деформация, механические свойства металлов и сплавов. Линейные дефекты определяют также магнитные и электрические свойства полупроводниковых и сверхпроводящих материалов, скорость роста кристаллов и т. д.

Первоначально представления о дислокациях были введены в физику кристаллов для того, чтобы объяснить несоответствие между наблюдаемой и теоретической прочностью и описать атомный механизм скольжения при пластической деформации кристаллов. Впоследствии теория дислокаций получила широкое развитие и стала применяться для анализа самых разнообразных явлений в металлах и сплавах. На первых этапах развития теории, представления о дислокациях были чисто гипотетическими, а прямые доказательства их существования были получены значительно позже.

Дислокация – линейное несовершенство кристалла, вблизи которого нарушено правильное расположение атомных плоскостей.

Основными геометрическими характеристиками дислокаций являются:

- вектор Бюргерса;
- направление линии дислокации.

Вектор Бюргерса – мера искаженности кристаллической решетки дислокацией. Он характеризует направление и величину сдвига, энергию дислокации, упругие напряжения, вызванные ею, действующие на дислокацию силы.

Для определения вектора Бюргерса необходимо провести сравнение решетки, содержащей дислокацию с совершенной решеткой без дислокаций. Для этого строят контур Бюргерса – замкнутый контур произвольной формы, проходящий по совершенной области решетки и охватывающий несовершенный участок, в котором находится дислокация. Схема определения вектора Бюргерса представлена на рис. 1.9.

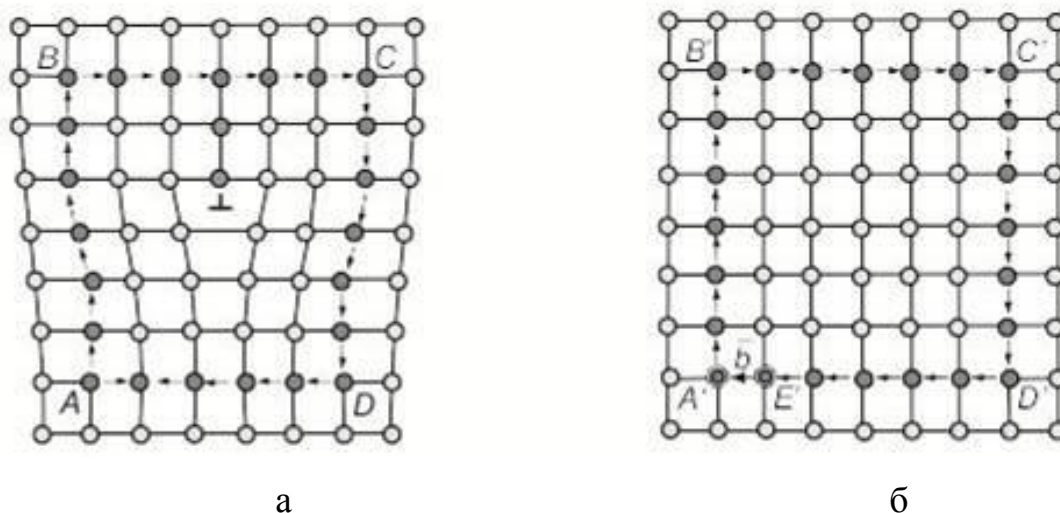


Рисунок 1.9 – Построение контура Бюргерса: а – вокруг краевой дислокации; б – в совершенном кристалле.

В решетке, содержащей дислокацию, проводят так называемый замкнутый контур Бюргерса ABCD (рис. 1.9 а.). Строят контур, начиная с точки А, последовательно переходя от атома к атому шесть межатомных расстояний вверх в совершенной области кристалла до точки В. Затем отсчитывают шесть межатомных расстояний вправо до точки С. После этого, отсчитав шесть межатомных расстояний вниз, попадают в точку D,

находящуюся на одном уровне с точкой А. Для того, чтобы замкнуть контур на отрезке DA необходимо пройти ровно пять межатомных расстояний.

Затем проводят соответствующий контур в совершенном кристалле, не содержащем дислокаций (рис. 1.9 б). В качестве исходной точки выбирают атом А' и повторяют число и направление “шагов”, сделанных при построении контура ABCD. Пройдя пять межатомных расстояний влево от точки D', попадают не в исходную точку А', а в точку E'. В результате чего получают незамкнутый контур. Для того, чтобы замкнуть контур необходимо провести из точки E' в точку А' вектор, который является вектором Бюргерса. Направление вектора Бюргерса зависит от направления обхода при построении контура Бюргерса.

На рис. 1.9 а видно, что кристаллическая решетка, содержащая дислокацию, в области, где проведен контур Бюргерса, искажена. Атомы решетки, окружающие дислокацию, испытывают взаимные небольшие упругие смещения, в результате чего замкнутый контур, проведенный в решетке с дислокацией, оказывается незамкнутым при построении в совершенном кристалле.

Величина вектора Бюргерса не зависит от того, насколько контур Бюргерса удален от дислокации. Чем дальше от дислокации располагают этот контур, тем меньше упругие смещения атомов в совершенной области, но тем длиннее контур, и сумма всех упругих смещений, накопившаяся при обходе, неизменна.

Другой важной геометрической характеристикой дислокаций является направление дислокационной линии. Направление дислокационной линии в данной ее точке отображается единичным вектором, который направлен по касательной к линии в этой точке.

Вектор Бюргерса в совокупности с направлением линии дислокации определяют плоскость скольжения, а угол между ними позволяет судить о характере дислокации на любом ее участке. Рассмотрим виды дислокаций в

зависимости от характера расположения дислокационной линии по отношению к вектору Бюргерса.

Если линия дислокации расположена перпендикулярно по отношению к вектору Бюргерса, дислокация называется краевой (рис.1.10).

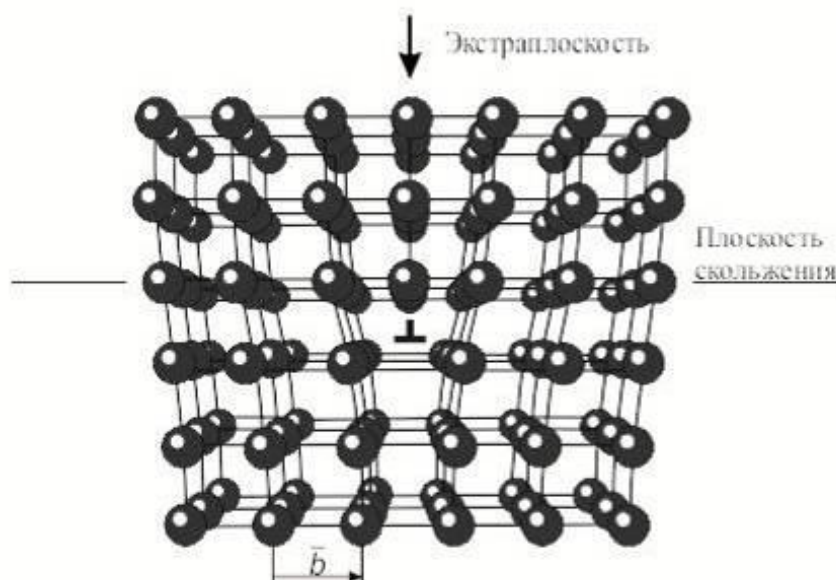


Рисунок 1.10 – Объемная модель расположения атомов, соответствующего краевой дислокации.

Краевой дислокацией является нижняя граница лишней, неполной атомной плоскости, называемой экстраплоскостью. Из рисунка видно, что большая часть искажения кристалла сконцентрирована около края экстраплоскости, поэтому эта дислокация получила название краевая.

Краевая дислокация является наиболее распространенной и характерной для кристаллического строения твердых тел. Схема возникновения краевой дислокации в результате сдвига верхней части кристалла относительно нижней на одно межатомное расстояние под действием приложенного сдвигающего напряжения τ представлена на рис.1.11.

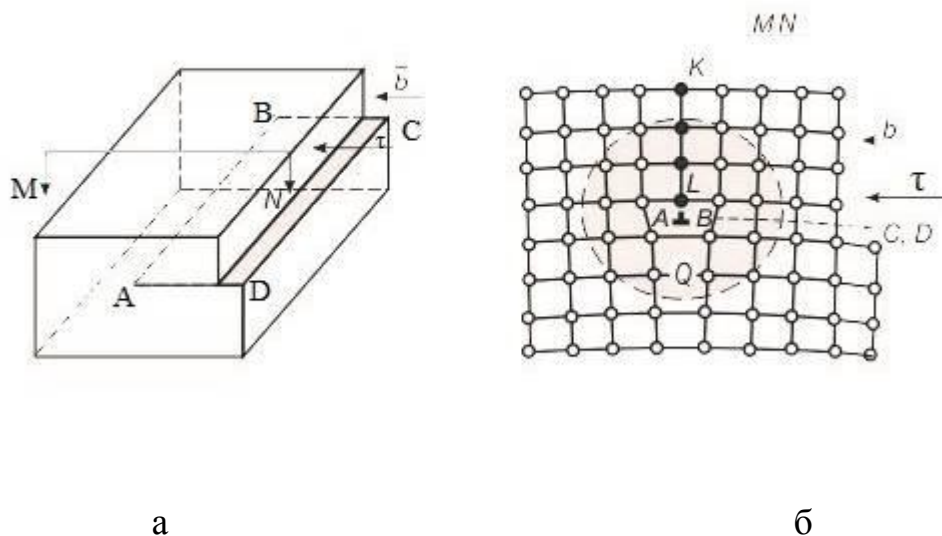


Рисунок 1.11 - Схема возникновения краевой дислокации АВ при сдвиге: а – объемная модель; б – плоская модель.

В данном случае ABCD – участок плоскости скольжения дислокации, АВ – дислокационная линия, определяющая границу этого участка (рис. 1.11, а). На рис.1.11,б показано сечение MN кристалла по атомной плоскости, перпендикулярной линии АВ на рис.1.11, а.

На схеме видно, что внутри кристалла вблизи края экстраплоскости решетка сильно искажена. В данном случае экстраплоскость действует подобно клину, вставленному в кристалл сверху вниз, вызывая искажения вокруг своего нижнего края. В результате межатомные расстояния в области Q выше плоскости скольжения ABCD меньше, а ниже плоскости скольжения больше, по сравнению с межатомными расстояниями в совершенной решетке.

Если экстраплоскость находится выше плоскости скольжения, то дислокация называется положительной, а если ниже – отрицательной. Положение центра ядра положительной дислокации (область Q) обозначается знаком $\perp$, отрицательной – ∇ .

Совокупность таких центров в параллельных атомных плоскостях образует линию дислокации.

Различия между положительной и отрицательной краевыми дислокациями условно. Переворачивая кристалл (рис.1.11), мы превращаем положительную дислокацию в отрицательную и наоборот.

Винтовые дислокации начали изучать позднее краевых. Понятие о винтовой дислокации в физику твердого тела было введено Бюргерсом в 1939 г.

На рис.1.12 представлена схема образования винтовой дислокации АВ.

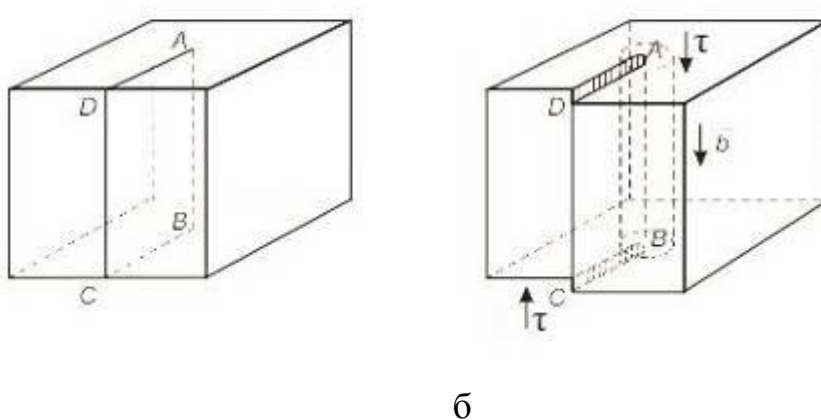


Рисунок 1.12 – Сдвиг, создавший винтовую дислокацию: а – кристалл до сдвига; б – кристалл после сдвига.

Для того, чтобы получить винтовую дислокацию необходимо в кристалле сделать надрез по плоскости ABCD (рис.1.12,а). Затем под действием касательных напряжений τ , приложенных к верхней и нижней граням кристалла, смещают края надреза на одно межатомное расстояние в направлении, параллельном дислокационной линии АВ (рис.1.12,б). На поверхности кристалла в результате такого сдвига образуется ступенька, оканчивающаяся в точке А.

Атомные плоскости, перпендикулярные дислокационной линии, преобразуются вследствие сдвига в винтовую поверхность, которая непрерывно закручивается вокруг линии АВ. Поэтому дислокация получила название винтовой.

Винтовая дислокация, подобно резьбе винта, может быть правой или левой. На рис.1.12 изображен кристалл с правой винтовой дислокацией. Для того, чтобы получить левую винтовую дислокацию необходимо сдвинуть левую часть кристалла вниз на одно межатомное расстояние по плоскости ABCD. Правую винтовую дислокацию можно преобразовать в левую (и наоборот) зеркальным отражением.

Так как дислокационная линия является границей области, в которой, произошел сдвиг под действием приложенного касательного напряжения, то она не может оборваться в совершенной области кристалла, а должна закончиться либо на свободной поверхности, либо на другой дислокации, либо на границе зерна или каком-нибудь другом дефекте.

В большинстве случаев линия дислокации в плоскости скольжения представляет собой кривую, отдельные участки которой могут иметь краевую или винтовую ориентацию, но большая ее часть не перпендикулярна и не параллельна вектору Бюргерса. Такой вид дислокации получил название смешанной.

Дислокационная линия также может образовывать внутри кристалла замкнутые кривые, называемые дислокационными петлями, отдельные участки которых имеют краевую (участки KL и NM) или винтовую (участки KN и LM) ориентацию (рис.1.13).

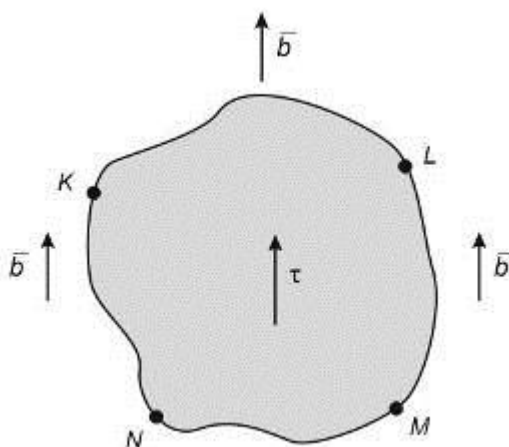


Рисунок 1.13. Схема дислокационной петли

Скольжение – это перемещение одной части кристалла по отношению к другой по определенной кристаллографической плоскости и в определенном кристаллографическом направлении без изменения объема. Процесс скольжения проявляется ступеньками на поверхности деформированного кристалла. В оптический микроскоп на полированной поверхности эти ступеньки выглядят в виде линий (рис.1.14), поэтому они получили название линий скольжения.



Рисунок 1.14 – Линии скольжения на поверхности пластически деформированного алюминия

Предпочтительным для скольжения в кристалле является наиболее короткое направление. В кристалле железа, например, таковым является направление $\langle 111 \rangle$.

Рассмотрим схему сдвига верхней части кристалла относительно нижней на одно межатомное расстояние при пробеге краевой дислокации слева направо через весь кристалл под действием приложенного касательного напряжения τ .

На рис.1.15, а изображены четыре последовательных положения дислокации при ее скольжении. Сдвиг распространяется постепенно из исходного положения 1 в конечное положение 4. При этом происходит

поочередное перемещение атомов на расстояние меньше межатомного, в результате чего дислокация перемещается через весь кристалл, приводя к образованию ступенек на боковых гранях кристалла.

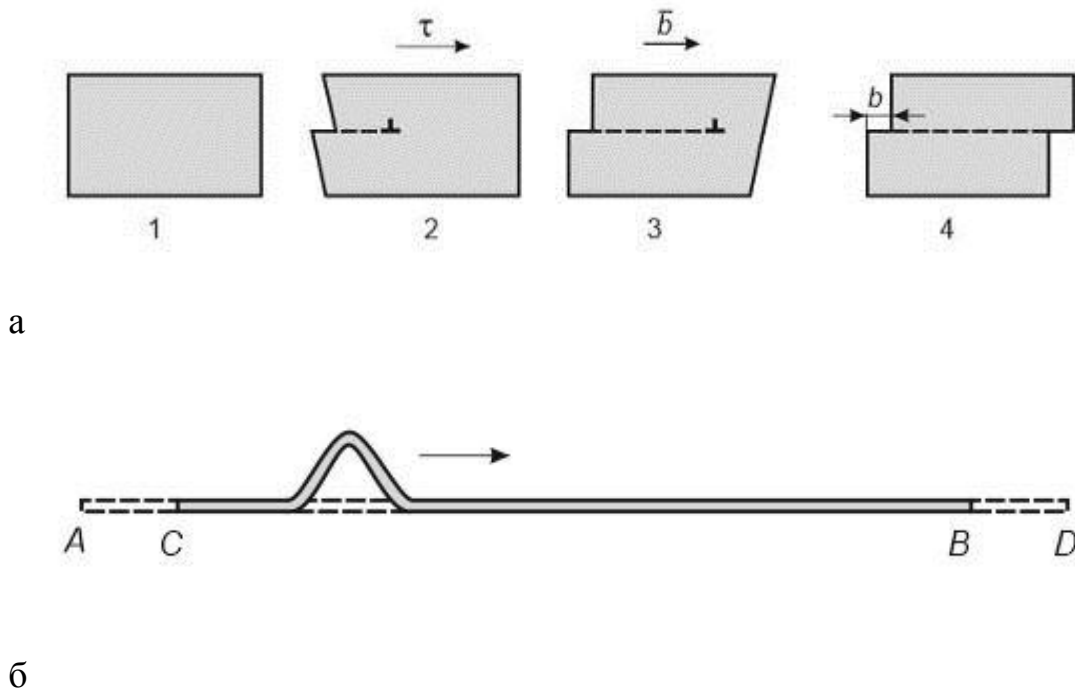


Рисунок 1.15 – Схема сдвига верхней части кристалла относительно нижней на одно межатомное расстояние при пробеге краевой дислокации слева направо (1-4) через весь кристалл (а), модель перемещения ковра из положения АВ в положение CD (б).

Развитие сдвига в кристалле при скольжении в нем краевой дислокации помогает понять следующая аналогия (рис.1.15, б). Ковёр из положения АВ в положение CD можно переместить, протаскивая его по полу как единое целое, но для этого необходимо приложить достаточно большое усилие. Точно такой же результат, но с меньшими затратами сил, дает продвижение складки от одного края ковра до другого. В природе аналогичным способом передвигаются некоторые змеи и гусеницы. Наблюдая за ними можно видеть,

что их движение происходит за счет перемещения складки тела, которая, образуясь у хвоста «перебегает» к голове.

Другой механизм перемещения краевой дислокации — переползание -- принципиально отличается от ее механизма скольжения. Перемещение краевой дислокации по механизму скольжения происходит в плоскости скольжения. При переползании перемещение происходит перпендикулярно плоскости скольжения.

Рассмотрим схему переползания положительной краевой дислокации (рис.1.16). В зависимости от направления перемещения краевой дислокации различают положительное и отрицательное переползание.

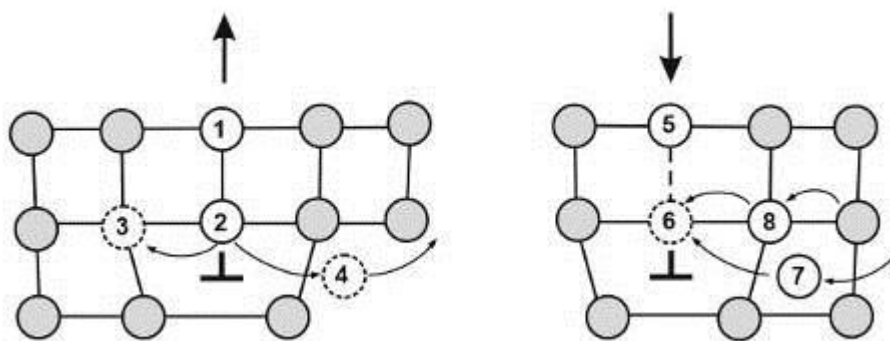


Рис. 1.16. Схемы переползания краевой дислокации:

- а) положительное переползание вверх – “растворение” экстраплоскости;
- б) отрицательное переползание вниз – достраивание экстраплоскости

Положительное переползание – перемещение из своей плоскости скольжения в вышележащую соседнюю плоскость, осуществляемое за счет отделения цепочки атомов на кромке экстраплоскости и их ухода внутрь кристалла (рис.1.16,а). При этом возможны два варианта переползания: перемещение атомов с кромки экстраплоскости в образовавшиеся при подходе вакансий к краевой дислокации свободные

места (из положения 2 в 3); диффузия атомов с кромки экстраплоскости в соседние междоузлия (из положения 2 в 4). 1-новое положение края экстраплоскости.

Наиболее вероятно переползание по первому механизму, так как в металле чаще наблюдается появление избыточной концентрации вакансий после закалки, облучения или пластической деформации. В то время как энергия образования межузельных атомов достаточно велика.

Отрицательное переползание – перемещение краевой дислокации в соседнюю плоскость скольжения вниз за счет присоединения одного атомного слоя к краю экстраплоскости (рис.1.16, б). В этом случае также возможны два варианта: диффузия и присоединение межузельных атомов к краю экстраплоскости (из 7 в 6); присоединение соседних атомов, с одновременным образованием вакансий, которые затем диффундируют внутрь кристалла (из 8 в 6).

Так как диффузия является термически активируемым процессом, то переползание, как диффузионный процесс, также термически активируемо. Скорость переползания краевой дислокации также зависит от концентрации вакансий и межузельных атомов.

Рассмотрим особенности движения винтовой дислокации. В отличие от краевой, винтовые дислокации имеют цилиндрическую симметрию относительно своей оси. Таким образом, все направления вокруг винтовой дислокации равнозначны, так что скольжение не ограничено перемещением в одной плоскости. Это приводит к тому, что винтовые дислокации имеют сравнительную свободу перемещения и оказывают важное влияние на общее пластическое поведение кристаллов.

Схема скольжения винтовой дислокации EF представлена на рис.1.17. В результате пробега дислокации от передней до задней грани кристалла произошло формирование на этих гранях ступенек, высота которых равна b .

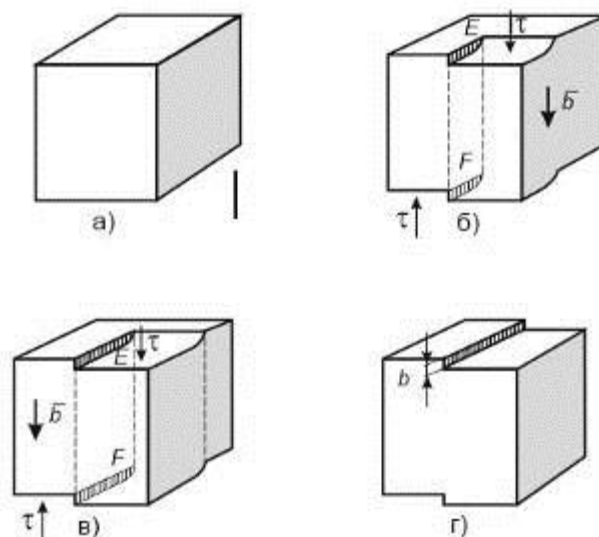


Рисунок 1.17 – Схема сдвига правой части кристалла относительно левой на одно межатомное расстояние вниз при пробеге винтовой дислокации EF от переднего края до заднего.

Винтовая дислокация в отличие от краевой может изменять плоскости скольжения бездиффузионным путем. Если на пути движения винтовой дислокации встретится какой-либо барьер (либо изменится направление сдвигающих напряжений), то дислокация продолжит свое скольжение в другой атомной плоскости, которая находится под углом к первоначальной плоскости скольжения. Этот процесс называют поперечным скольжением.

Дислокации в кристалле являются источником внутренних напряжений и повышают его энергию. С точки зрения энергетического состояния область вокруг дислокации можно разделить на две части: ядро дислокации и упругое поле дислокации.

Энергия дислокации соответствует сумме энергий этих двух областей. При этом упругое поле составляет большую часть энергии дислокации.

В процессе пластического деформирования кристалла наблюдается увеличение количества дислокаций. По мере возрастания плотности дислокаций все более существенным становится их взаимодействие. Так как

решетка вокруг дислокации является искаженной, то в этой области присутствует упругое поле напряжений. Напряжения вокруг дислокации являются источником силы, действующей на соседнюю дислокацию.

В случае взаимодействия двух одноименных краевых дислокаций, расположенных в одной плоскости скольжения между ними действуют только силы отталкивания, обусловленные большими искажениями решетки вокруг дислокаций. При сближении разноименных краевых дислокаций, находящихся в одной плоскости скольжения, происходит объединение их экстраплоскостей в одну (аннигиляция дислокаций).

У одноименных винтовых дислокаций, независимо от расстояния, между ними действуют силы отталкивания, их поля напряжений усиливают друг друга. Если взаимодействуют винтовые дислокации разного направления (левая и правая), независимо от их взаимного положения, между ними действует сила взаимного притяжения. При встрече разноименных винтовых дислокаций их поля напряжений взаимно уничтожаются и дислокации аннигилируют.

В процессе пластической деформации образуется большое число новых дислокаций путем размножения по механизму Франка-Рида (рис.1.18).

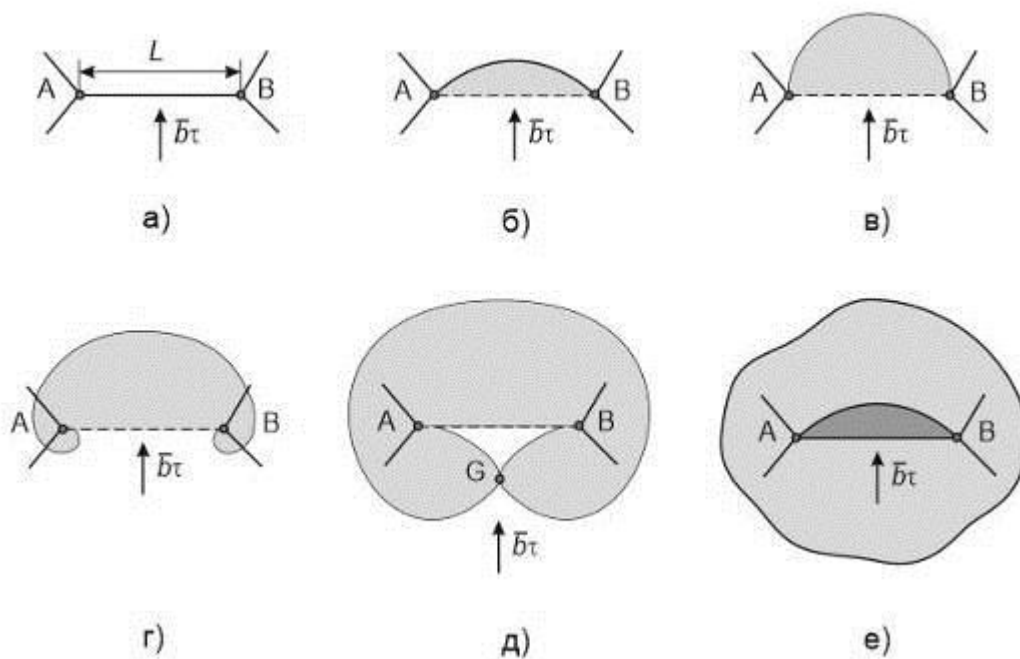


Рисунок 1.18 – Схема зарождения дислокаций по механизму источника Франка-Рида.

Источником является дислокация АВ, концы которой закреплены узлами дислокационной сетки или каким-либо другим способом (рис.1.18, а). Дислокация АВ лежит в плоскости скольжения, и имеет соответствующий скольжению вектор Бюргерса. Приложенные напряжения τ выгибают линию дислокации в дугу (рис.1.18, б), а линейное натяжение дислокации стремится вернуть ее в исходное состояние. Линейное натяжение дислокации находится в статическом равновесии с приложенным напряжением до тех пор, пока это напряжение не достигнет величины

$$\tau_{кр} \approx \frac{G \cdot \bar{b}}{L}, \quad (1.1)$$

где L – длина дислокации АВ.

При этом значении напряжения радиус полупетли дислокации равен $L/2$ (рис.1.18, в). Дальнейшее расширение петли происходит свободно, так как

приложенная сила превышает линейное натяжение дислокации. Постепенно расширяющаяся петля остается закрепленной в точках А и В и поэтому закручивается вокруг этих точек в виде двух симметричных спиралей под действием силы (рис.1.18, г), направленной перпендикулярно линии дислокации на всех ее участках. Продолжающееся увеличение петли дислокации приводит к тому, что симметричные спиралевидные части дислокации соприкасаются в точке G (рис.1.18, д). В точке соприкосновения встречаются дислокации разных знаков, в результате чего происходит их аннигиляция. Таким образом, одна дислокация разделяется на две – замкнутую петлю и исходную дислокацию АВ (рис.1.18, е). При условии, что концы восстановленной дислокации АВ останутся на своих местах и местное напряжение у источника превышает критическое значение $\tau_{кр}$, будет происходить дальнейший процесс образования новой петли по описанному выше механизму. Источник Франка-Рида может генерировать неограниченное число дислокационных петель в одной плоскости скольжения и создавать тем самым значительный сдвиг.

Другим механизмом размножения дислокаций является множественное поперечное скольжение. Механизм действия его подобен действию источника Франка-Рида, но не требует дислокационной линии, закрепленной с обоих концов. Множественное поперечное скольжение представляет собой эффективный механизм размножения дислокаций, приводящий к образованию дислокационной линии большой протяженности в различных плоскостях, и к работе новых источников.

Для описания макроскопического поведения материала при пластической деформации применяют диаграммы растяжения (рис. 1.19). (Испытания на растяжение подробно рассмотрены ниже в соответствующем разделе УМК ПОП.).

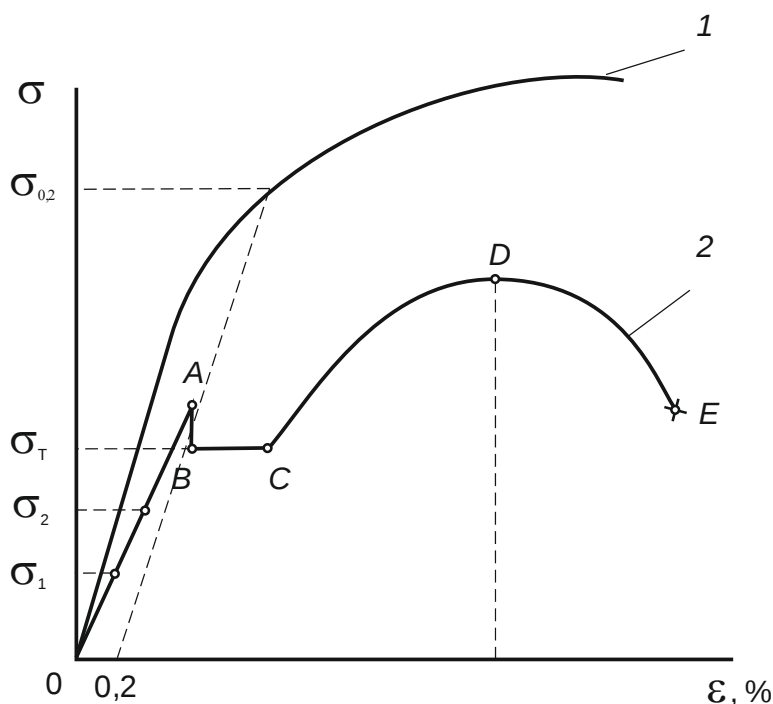


Рисунок 1.19 – Кривые растяжения для высокопрочных (1) и вязких низкопрочных (2) материалов.

Кривые для различных материалов имеют одну и ту же форму, но уровни напряжения и наклоны прямолинейных участков неодинаковы. Характерными для кривых являются следующие участки:

- OA – соответствует упругой и микропластической деформации;
- AB – предел текучести (точка A характеризует верхний предел текучести, точка B – нижний предел текучести);
- BC – площадка текучести (на этом участке кривой деформация растет при постоянном напряжении);
- CD – участок, соответствующий деформационному упрочнению и зарождению субмикротрещин;
- DE – на этом этапе деформации имеет место развитие магистральной трещины и разрушение образца.

Рассмотрим поведение дислокаций при увеличении напряжений на участке OA. Условно будем считать, что до приложения нагрузки все дислокации заблокированы. В этом случае под действием нагрузки начинают двигаться новые дислокации, образованные от отдельных источников,

предпочтительно расположенных на межфазных границах. При этом напряжение, необходимое для начала движения свежих дислокаций значительно ниже напряжения старта заблокированных дислокаций (σ_1).

При напряжениях от нуля до σ_1 имеет место только упругая деформация. Дислокации, испущенные источником, будут удерживаться около него упругими силами, возникающими в окружающей матрице. При росте приложенного напряжения от σ_1 до σ_2 деформация становится неупругой, но полностью обратимой.

При напряжении σ_2 появляется остаточная пластическая деформация. Дальнейшее увеличение напряжения до σ_T вызывает микропластическую деформацию, связанную с активизацией новых источников и увеличением числа свободных дислокаций.

Дальнейший процесс активного пластического течения (участок АС на рис.1.19) связывают с переходом движущихся дислокаций в соседние зерна через их границы. Одна из таких теорий, связывающая величину предела текучести σ_T с напряжением σ_0 , необходимым для преодоления дислокациями препятствий внутри зерен, была предложена Холлом и Петчем. Ими была выведена зависимость, связывающая σ_T с размером зерна d , названная уравнением Холла-Петча:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k d^{-1/2}, \quad (1.2)$$

где k – постоянная величина, характеризующая процесс эстафетной передачи скольжения дислокаций через границы зерен.

Сущность теории Холла-Петча заключается в эстафетной передаче скольжения дислокаций от зерна к зерну за счет возбуждения источников новых дислокаций в соседних зернах. Схема передачи скольжения дислокаций через границу между зернами 1 и 2 представлена на рис.1.20.

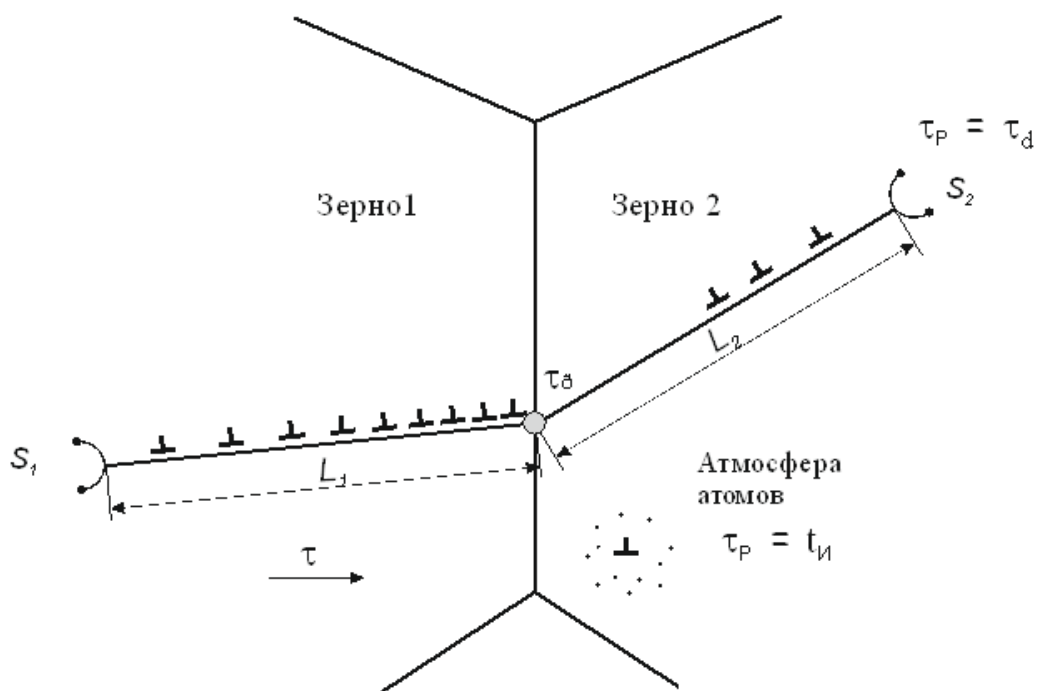


Рисунок 1.20 – Схема эстафетной передачи скольжения дислокаций через границу зерен 1 и 2.

Под действием приложенного касательного напряжения τ в зерне 1 начинает генерировать источник дислокаций S_1 (по типу Франка-Рида), расположенный на расстоянии L_1 от границы зерна. Образовавшиеся дислокации движутся по плоскости скольжения в направлении приложенного напряжения и скапливаются на границе зерна, которая препятствует их дальнейшему продвижению. Скопление дислокаций вызывает увеличение напряжения на границе τ_p . Это напряжение прямо пропорционально числу n скопившихся дислокаций : $\tau_p = f(n)$.

При невысоких температурах под влиянием τ_p в зерне 2 активизируется источник дислокаций S_2 , т. е. $\tau_p = \tau_d$, где τ_d – напряжение, необходимое для старта источника S_2 . При повышенных температурах или в случае уже имеющихся слабо закрепленных дислокаций в зерне 2 наблюдается освобождение дислокаций от атмосфер и их движение к границе, в этом случае $\tau_p = \tau_{и}$, где $\tau_{и}$ – напряжение разблокировки дислокаций от атмосфер.

Падение напряжения на участке АВ (см. рис. 1.19) частично может быть обусловлено тем, что для развития полосы Чернова-Людерса требуются меньшие напряжения, чем для ее зарождения.

Когда полоса Чернова-Людерса проходит через весь образец, начинает развиваться однородная макроскопическая деформация (участок CD, см. рис. 1.19). При этом активизируется пластическое течение во всех зернах и по многим плоскостям скольжения. Эти явления приводят к деформационному упрочнению, развивающемуся вплоть до нарушения сплошности образца. Деформационное упрочнение объясняется активным взаимодействием движущихся дислокаций, количество которых непрерывно возрастает за счет развития множественного поперечного скольжения и образования большого числа порогов, пересечений и петель.

Таким образом, предел текучести материала определяется, прежде всего, напряжением, необходимым для перемещения дислокаций в материале, в том числе напряжением, необходимым для:

- отрыва дислокаций от атмосфер включений;
- прохождения дислокаций через лес других дислокаций;
- того, чтобы начали действовать источники Франка-Рида.

Кроме того, предел текучести определяется сопротивлением трения в кристалле при движении дислокаций.

Дислокации оказывают исключительно большое влияние на прочность металла, весьма эффективно снижая сопротивление деформации. Но, в то же время, взаимодействуя между собой, а также с другими препятствиями, они повышают прочность металлов.

Характеристикой, непосредственно влияющей на сопротивление сплава пластической деформации, является плотность дислокаций, т.е. их суммарная длина, приходящаяся на единицу объема металла (см/см³).

Согласно теории И.А.Одинга., зависимость между плотностью дислокаций ρ и прочностью металла σ_T может быть представлена в виде графика на **рис.1.21**.

Минимальная прочность металла на этом графике определяется некоторым критическим значением плотности дислокаций $\rho_{кр}$, приблизительно равным 10^6 - 10^7 см⁻² (точка В). Эту величину относят к отожженным металлам (предел текучести отожженного железа ~ 150 МПа).

Относительно точки В на графике можно выделить два пути упрочнения материалов.

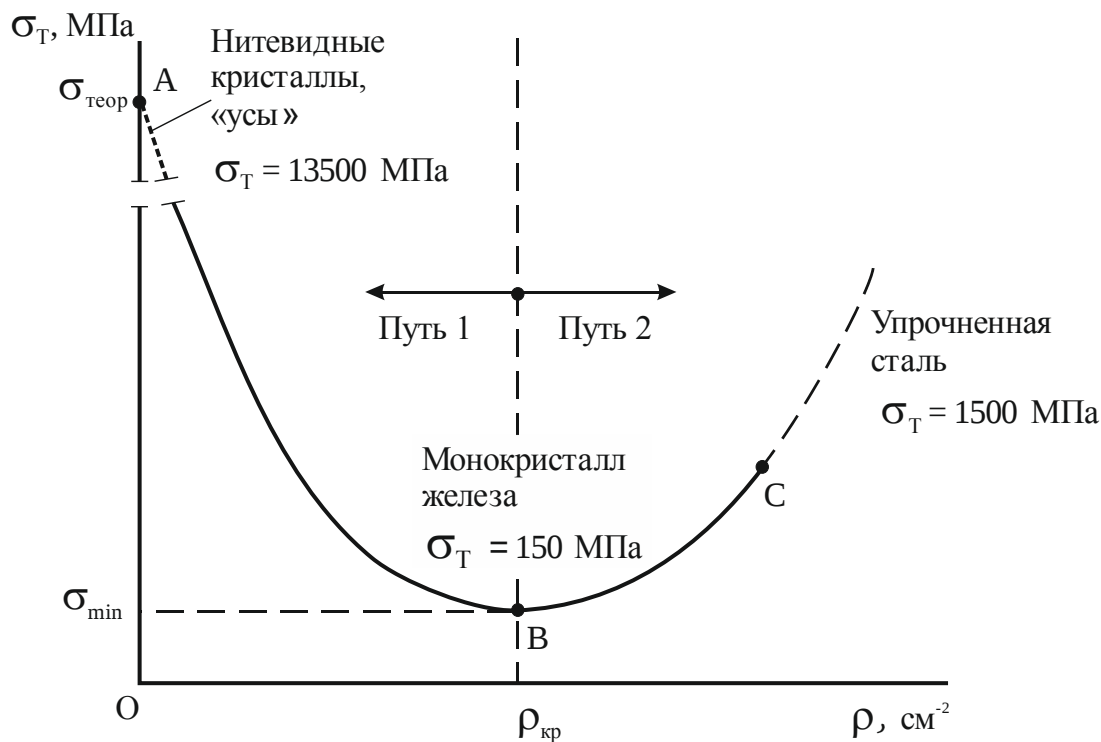


Рис.1.21 – Кривая Одинга.

Путь 2 соответствует участку кривой справа от точки В. Упрочнение достигается за счет повышения плотности дислокаций, а, следовательно, и за счет их активного взаимодействия и повышения сопротивления пластической деформации (участок ВС). Этот способ повышения прочности хорошо известен и широко используется на практике.

Более эффективного упрочнения можно достичь, если идти по пути 1, влево относительно точки В. В соответствии с кривой Одингга в этом случае происходит повышение прочности при уменьшении плотности дислокаций (участок АВ). Точка А соответствует теоретической прочности, т.е. прочности бездефектного материала. Верхняя часть участка АВ, вблизи точки А, соответствует прочности так называемых “усов” специально выращиваемых продолговатых кристаллов с очень низкой плотностью дислокаций. Прочность “усов” близка к теоретической и значительно выше прочности реального металла.

1. 4. Мезодефекты

Мезоскопический уровень структур материалов и мезодефекты этого уровня стали известными материалововедам относительно недавно. С развитием метода электронной микроскопии во второй половине XX века появилась возможность увидеть дислокационные ансамбли внутри зерен, заметить внутризеренные структурные подразделения, которые были названы субзернами.

Основываясь на современной классификации структур все детали внутреннего строения зерен, дислокационные ансамбли, субграницы и многочисленные отклонения от правильного кристаллического строения внутри зерен относят к мезодефектам.

Между поведением отдельных дефектов на микроскопическом уровне и упругопластическим поведением тела на макроскопическом уровне лежит обширная область мезоскопических эффектов. Экспериментальные исследования показали, что фрагментированная структура типична для больших деформаций всех кристаллов. Размеры фрагментов исчисляются в долях микрона и являются характерным масштабом мезоскопического уровня.

Появление внутри зерен при пластической деформации отдельных объемов с взаимной разориентировкой подтверждается электронно-микроскопическими и рентгеноструктурными исследованиями. Границами блоков, фрагментов, полигонов являются стенки дислокаций. Средняя плотность дислокаций внутри блоков относительно низка: $10^7 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$, а в стенках на 2, ...3 порядка выше. Размеры блоков могут значительно различаться в зависимости от температуры и степени деформации, обычно средний поперечник блока составляет несколько микрон. Степень разориентировки также зависит от условий образования фрагментов, но ограничивается 1° .

В процессе ползучести или при повышении температуры деформированного металла блоки могут трансформироваться в субзерна, при этом могут возникать разномасштабные новые структурные образования. Так, возникают субзерна с размерами 50 ... 160 мкм с взаимной разориентировкой в $1 \dots 5^\circ$. Внутри субзерен могут оставаться блоки – фрагменты с разориентировкой в $10 \dots 60'$. При активной пластической деформации в холодном состоянии возникает ячеистая субструктура.

В работах научной школы Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе РАН вскрыты особенности дефектной структуры ОЦК - и ГЦК-металлов после значительной пластической деформации. Независимо от исходной структуры (монокристалл, поликристалл, мартенсит и т.д.) в развитии пластической деформации участвуют дислокационные ансамбли, развиваются коллективные формы движения. Такие активные дислокационные перемещения приводят к фрагментации структуры, которая отличается от блочной, появляющейся при ползучести. Размер фрагментов 0,1 ... 0,5 мкм, а разориентация достигает нескольких градусов. Важным моментом в образовании фрагментов является организация полосовых структур, которые возникают от границы и распространяются вглубь зерна.

Факт фрагментации структуры любых металлов при достаточной степени деформации обязательно связан с разориентировкой этих фрагментов. Сам процесс разориентировки может осуществляться пластической деформацией в микрообъемах методом поворотов. Дисклинация — линейный дефект в кристалле, представляющий область упругого искажения кристаллической решетки, связанный с поворотом на определенный угол одной части кристалла относительно другой в ограниченной области и вызывающий изменение взаимного расположения атомов и симметрии совершенного кристалла. Дисклинация в результате поворота одной части кристалла относительно другой называется дисклинацией кручения, а дисклинация, связанная с изменением осевой симметрии кристалла, называется клиновой дисклинацией.

Дисклинация считается полной, если угол поворота одной части кристалла относительно другой соответствует возможному углу поворота вокруг оси симметрии совершенной кристаллической решетки. У частичной дисклинации угол поворота одной части кристалла относительно другой меньше минимально возможного угла поворота оси симметрии совершенной кристаллической решетки. При возникновении частичной дисклинации внутри кристалла образуется граница, по обе стороны которой части кристалла разориентированы на соответствующий угол.

Геометрически частичную дисклинацию можно представить линией, которая ограничивает незаконченную или оборванную границу блока, фрагмента, полигона или субзерна. (рис.1.22).

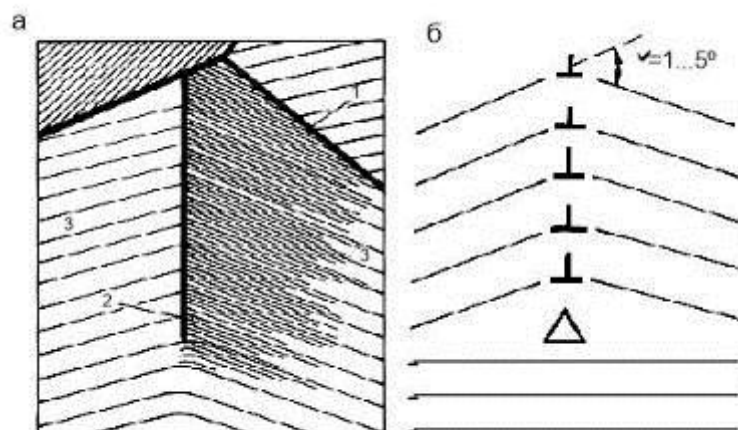


Рисунок 1.22 – Схема оборванной субграницы наклона (а) и модель частичной клиновой дисклинации (б): 1 – высокоугловая граница зерна; 2 – малоугловая граница субзерна (субграница); 3 – соседние субзерна.

Деформационные процессы в металлах на стадии коллективных эффектов в дислокационных ансамблях при значительной степени деформации могут быть описаны в терминах теории дисклинаций. При детальном рассмотрении блочной и фрагментированных структур вскрывается необходимость в описании их геометрии (разворотов, разориентации) и расчете напряжений. Эти задачи решаются введением дисклинаций, образованных на стыках субзерен, блоков, фрагментов. Дисклинационные представления необходимы для описания деформационных процессов тогда, когда теория дислокаций не может корректно ответить на возникшие вопросы. Наиболее перспективной областью развития дисклинационных концепций являются упрочнение, пластическая деформация и разрушение металлических сплавов.

1.5. Структурные модели пластической деформации и разрушения материалов

1.5.1. Понятие о физической мезомеханике материалов

Элементарные акты пластической деформации, представленные как перемещения единичных дислокаций, составляют физическую природу любой пластической деформации, развивающейся в любом объеме металла. Эти явления исследуются методами металлографического эксперимента и описываются теорией дислокаций, не располагающей строгим математическим аппаратом, так как многие исходные данные для таких расчетов экспериментально получить пока не удастся.

Тем не менее, именно теория дислокаций, создавая, рассматривая и количественно оценивая различные элементарные модели торможения движущихся дислокаций, явилась эффективным стимулом научного поиска оптимальных решений в проблеме повышения прочности материалов.

Основной принцип повышения прочности путем создания барьеров, препятствий на пути движущихся дислокаций, с одной стороны, объяснил известные процессы упрочнения (например, старение дуралюмина, высокую прочность мартенсита и др.), с другой – послужил основой создания новых высокопрочных сплавов (например, мартенситностареющие или трип стали и др.).

Дальнейшие научные исследования в этом направлении, основывающиеся на теории дислокаций, испытывают затруднения в преодолении весьма существенного противоречия, в сущности главного принципа дислокационного упрочнения – барьерного эффекта. Все структурные изменения в материале, препятствующие движению дислокаций и повышающие сопротивление пластическому деформированию, одновременно снижают трещиностойкость.

В последние годы получило развитие компьютерное исследование процессов, происходящих на микроскопическом уровне. Оно имеет важное научно-практическое значение, так как ведет к углублению понимания о закономерностях поведения материала на атомном уровне и позволяет более

эффективно решать задачи, связанные с компьютерным конструированием материалов.

Рассмотренные выше дефекты реальной структуры материалов и современная классификация структур позволяют по-новому видеть иерархию структурных уровней пластической деформации и разрушения материалов (рис.1.23).

Новое научное направление – физическая мезомеханика материалов – в качестве основного объекта исследования рассматривает мезообъемы деформируемого материала и изучает развитие неоднородной пластической деформации.

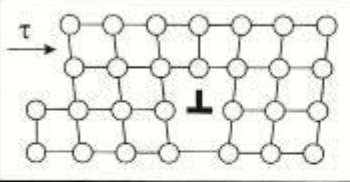
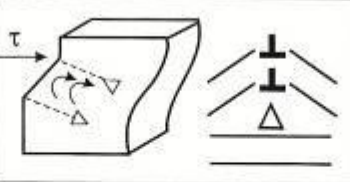
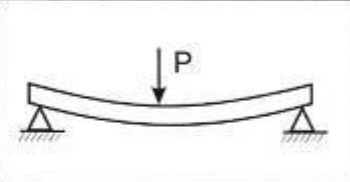
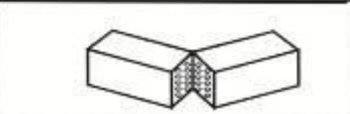
Структурные уровни деформации		
МИКРО	МЕЗО	МАКРО
		
$\frac{dy}{dt} = \bar{b} \cdot \bar{V} \cdot \rho$	$\dot{\epsilon} = D \cdot \bar{V} \cdot \bar{W} \cdot 2a$	$E = \frac{\sigma_{\tau}}{\epsilon_{\tau}} \quad \sigma_{доп} = \sigma_{\tau} \cdot \frac{1}{n}$
Теория дислокаций. Микромеханика разрушения	Теория дисклинаций. Мезомеханика деформ. разруш.	Континуальная теория пластич. Механика разрушения
Размеры структурных элементов - блоков, м		
$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-1}$
		

Рисунок 1.23 – Общая схема иерархии структурных уровней пластической деформации и разрушения материалов (по Л. И. Тушинскому).

Согласно концепции физической мезомеханики, пластическая деформация в материале определяется процессами, происходящими на разных масштабных и структурных уровнях. Одна из основных задач

мезомеханики заключается в исследовании локального отклика материала на разных масштабных уровнях, в описании неоднородного напряженно-деформированного состояния на мезоуровне и в получении макроскопического отклика в результате осреднения по всем структурным элементам.

Новым направлением в физике деформационного упрочнения, в создании субструктур деформации является представление о ротационных модах, о поворотах, наблюдаемых на микро- и макроуровнях. Установлено, что в пластической деформации вместе с трансляционным скольжением участвуют поворотные моды; вместе с микродеформацией (движение дислокаций) имеет место и макродеформация за счет поворотов целых структурных агрегатов. Развиваются представления об участии и макродеформации зерен, их конгломератов, субзерен, ячеек, т.е. процесс деформации рассматривается как многоуровневый. Согласно Л. И. Тушинскому иерархия структурных элементов по мере уменьшения размеров представляется следующим рядом: образец, зерна, фрагменты зерен, блоки, ячейки, дислокации, атомы, электроны.

Мезоуровень в металлах отличается наибольшим разнообразием относящихся к нему структурных элементов. В. Е. Панин выделяет на мезоуровне в поликристалле два подуровня – мезо-I и мезо-II, которые отличаются по масштабу относящихся к ним структурных элементов. К мезо-I относятся процессы, происходящие внутри зерен – формирование и эволюция субструктур (ячеистой, полосовой и т.д.). Для математического описания таких явлений классической теории дислокаций уже становится недостаточно.

К мезо-II относятся структурные элементы большего масштаба по сравнению с мезо-I. Это отдельные зерна и конгломераты, включающие достаточно много зерен, которые формируются в процессе деформирования, сдвигаются и поворачиваются как целое. Для описания процессов,

происходящих на мезо-П, необходимо вводить в рассмотрение зерна, межзеренные границы, границы фаз, включения, поры и т.д. в зависимости от поставленной задачи.

Макропроцессы, включающие упругую, пластическую деформацию и процесс разрушения, развивающиеся в деталях машин, конструкциях или образцах, охватывают значительные объемы, соизмеримые с размерами вышеперечисленных объектов.

Мезоструктурный уровень пластической деформации связан с движением дислокационных ансамблей, с осуществлением ротационных мод, с развитием активных поворотов и общей турбулентности. Явления ротационной пластической деформации, развивающиеся в объемах зерен или в целых структурных комплексах, могут описываться новой теорией дисклинаций.

Исследования последних лет показали главенствующую роль именно мезоструктуры в формировании важных механических характеристик промышленных сплавов. При внешнем нагружении, процессы деформирования протекают с различной интенсивностью, но на всех структурных уровнях. Начинается деформирование на микроуровне, затем вовлекается мезоуровень, и уже после предела текучести события развиваются на всех трех уровнях: микро, мезо и макро.

1.5.2. Структурные модели разрушения материалов.

При развитии пластической деформации в отдельных зернах сплава могут активизироваться процессы зарождения субмикротрещин. Зарождение трещины в совершенном кристалле, или гомогенное зарождение, требует огромных усилий, равных по своему уровню теоретической прочности кристалла.

Обычные реальные кристаллы разрушаются при значительно меньших напряжениях. В этом случае происходит гетерогенное зарождение, которое

облегчается либо за счет готовых концентраторов напряжений в виде включений, либо при локализации пластического течения. Если и то и другое отсутствует, как, например, в случае нитевидного кристалла (уса), то напряжение зарождения трещины становится равным теоретической прочности.

Многими исследователями предлагались различные модели возникновения субмикротрещин при локализации пластического течения по определенным плоскостям или полосам скольжения в зерне. В их основе лежат известные представления о дислокационных скоплениях перед различными препятствиями, такими как граница зерна или двойника, инородное включение и т. д. Приведем основные модели зарождения субмикротрещин в однофазном сплаве (рис.1.24).

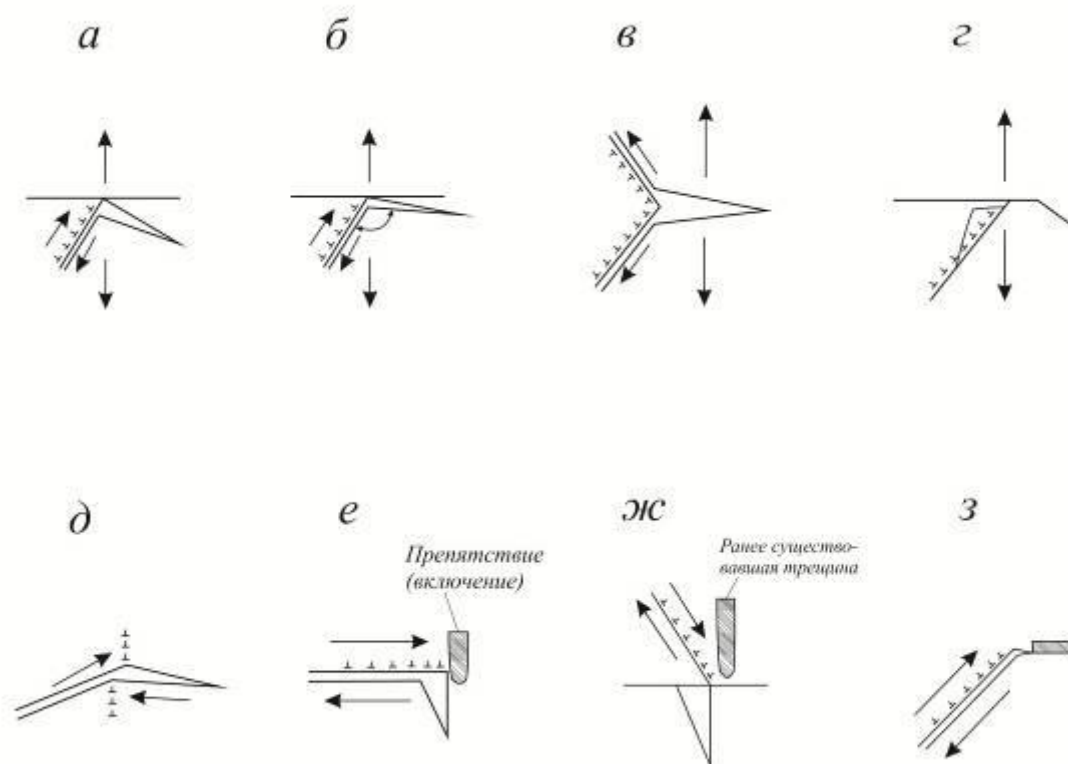


Рисунок 1.24 – Модели зарождения субмикротрещин в однофазном сплаве: а—Зинера—Стро; б—Стро; в—Коттрелла; г—Баллафа—Гилмана; д—Орована—Стро; е,ж,з--Екобори

Модель Зинера — Стро (рис. 1.24, а) основывается на представлениях о том, что в голове полосы скольжения, заблокированной границей зерна, возникает концентрация напряжения σ пропорционально числу заблокированных дислокаций. По этому механизму, усовершенствованному Стро (рис. 1.24, б), трещина возникает за счет растягивающих напряжений, имеющих максимальное значение в плоскости, расположенной под углом 110° к плоскости скольжения.

В модели Коттрелла предусматривается зарождение трещины в результате пересечения двух плоскостей скольжения (рис. 1.24, в), что характерно для металлов с ОЦК-решеткой. Модель Баллафа — Гилмана (рис. 1.24, г) отличается от моделей Зинера — Стро (рис. 1.24, а, б) тем, что трещина возникает в самой плоскости скольжения. В модели Оровапа — Стро (рис. 1.24, д) учитывается явление полигонизации, при которой образуются дислокационные стенки, происходят изгиб плоскости скольжения и образование трещины. Этот механизм экспериментально был обнаружен при изгибе монокристаллов цинка и, вероятно, справедлив для хрупких металлов.

В модели Екобори в качестве барьеров рассматриваются включения (рис. 1.24, е) или ранее созданные трещины (рис. 1.24, ж, з). Новые трещины образуются в данном случае из-за взаимного неблагоприятного наложения пика существующих напряжений и концентрации напряжений в голове дислокационных нагромождений.

Рассмотренные модели отличаются по уровню критического напряжения, необходимого для зарождения трещины. Расчет этих

напряжений затруднен, так как для этого необходимы сведения не только о размере зерен, но и о сопротивлении движению дислокаций в теле зерна и энергии образования новых поверхностей.

Если субмикротрещины в материале возникли, то это не значит, что они будут активно развиваться. Установлено, что в поликристаллическом железе образуются микротрещины внутри зерен после пластического течения, но они не распространяются, пока приложенные напряжения значительно не возрастут. В принципе для дальнейшего развития трещины необходим уровень напряжений у ее вершины, превышающий когезионную прочность материала. При росте внешнего напряжения субмикротрещины могут развиваться за счет возникновения критических дислокационных ситуаций в соседнем зерне. Этот процесс по своей схеме похож на эстафетную передачу пластического течения от зерна к зерну (см. рис. 1.20).

1.5.3. Виды разрушения. Хрупкое и вязкое разрушения

Разрушение -- физический процесс объединения субмикро-и микротрещин и роста трещин. Разрушение приводит к нарушению сплошности и разделению твердого тела на несколько частей.

По степени локальности разрушения классифицируют:

- субмикроскопическое, происходящее в пределах одного структурного элемента (рис. 1.25),
- микроскопическое (рис. 1.26.),
- макроскопическое (соизмеримое с размерами поперечного сечения детали) (рис.1.27).

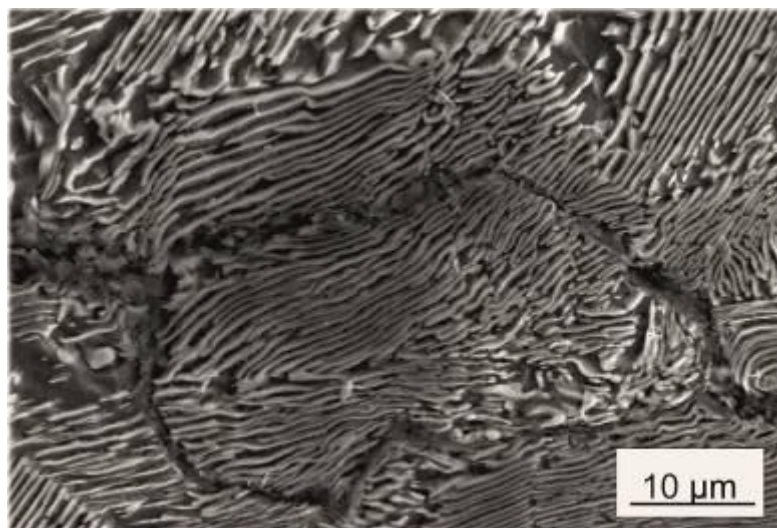


Рисунок 1.25 – Разрушение на субмикроскопическом уровне.
Распространение трещины по границе перлитной колонии

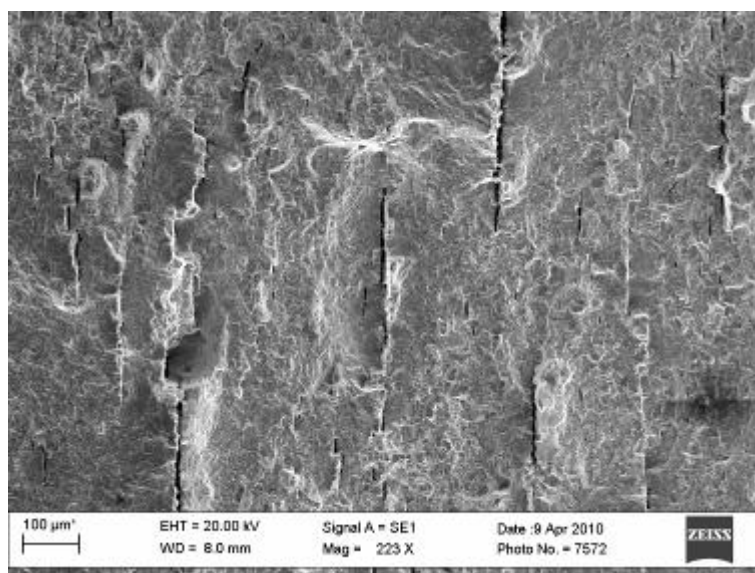


Рисунок 1.26 – Разрушение на микроскопическом уровне по границам
неметаллических включений.



Рисунок 1.27 – Разрушение на макроскопическом уровне. Трещина в ударнике пневмопробойника

По ориентировке макроскопической поверхности разрушения (излома) различают: отрыв (поверхность перпендикулярна к направлению действия максимальных растягивающих напряжений); срез (поверхность направлена под углом 45^0 к направлению действия максимальных растягивающих напряжений).

По виду поверхности излома различают вязкое и хрупкое разрушения. При вязком разрушении происходит постепенное накопление повреждений материала, затем в каком-то случайном месте протекает пластическая деформация (формирование шейки) и разрушение с образованием поверхности раздела.

Хрупкое разрушение происходит путем образования трещины и ее роста до критического размера. Такому разрушению предшествует пластическая деформация до достижения трещиной критического размера, затем происходит хрупкое бездислокационное разрушение. Для хрупкого разрушения характерны острая (рис. 1.28, *a*), часто ветвящаяся трещина и

большая скорость ее распространения (0,4...0,5 скорости звука в материале). Вязкое разрушения происходит при раскрывающейся трещине. Для этого вида разрушения характерна тупая трещина (рис. 1.28, б), малая скорость ее движения и значительная пластическая деформация металла при ее продвижении.

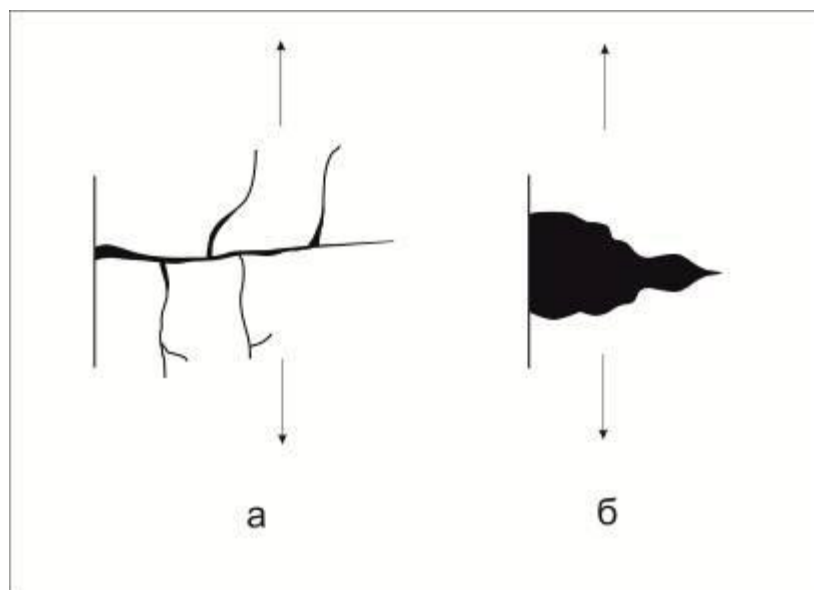
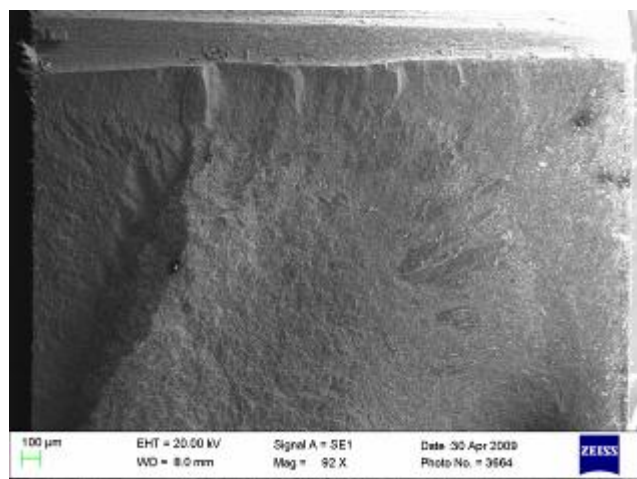
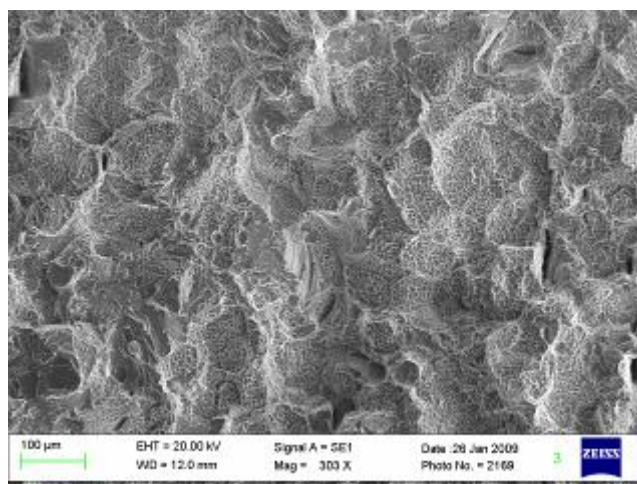


Рисунок 1.28 – Хрупкая (а) и вязкая(б) трещины

Так как распространение трещины при хрупком разрушении происходит в результате разрыва межатомных связей по кристаллографическим плоскостям зерен, эти плоскости хорошо отражают световые лучи. Поэтому поверхность разрушения в данном случае блестящая (кристаллографическая). Такой излом также называют ручьистым (рис. 1.29, а). Излом на схеме 1.29, б — вязкий (чашечный).



а



б

Рисунок 1.29 – Схема и снимки хрупкого (а) и вязкого (б) изломов (сечение перпендикулярно поверхности разрушения)

Пластическое разрушение происходит после существенной пластической деформации, протекающей по всему объёму тела. На поверхности разрушения видны следы пластической деформации в виде ямок и волокон (рис. 1.30).

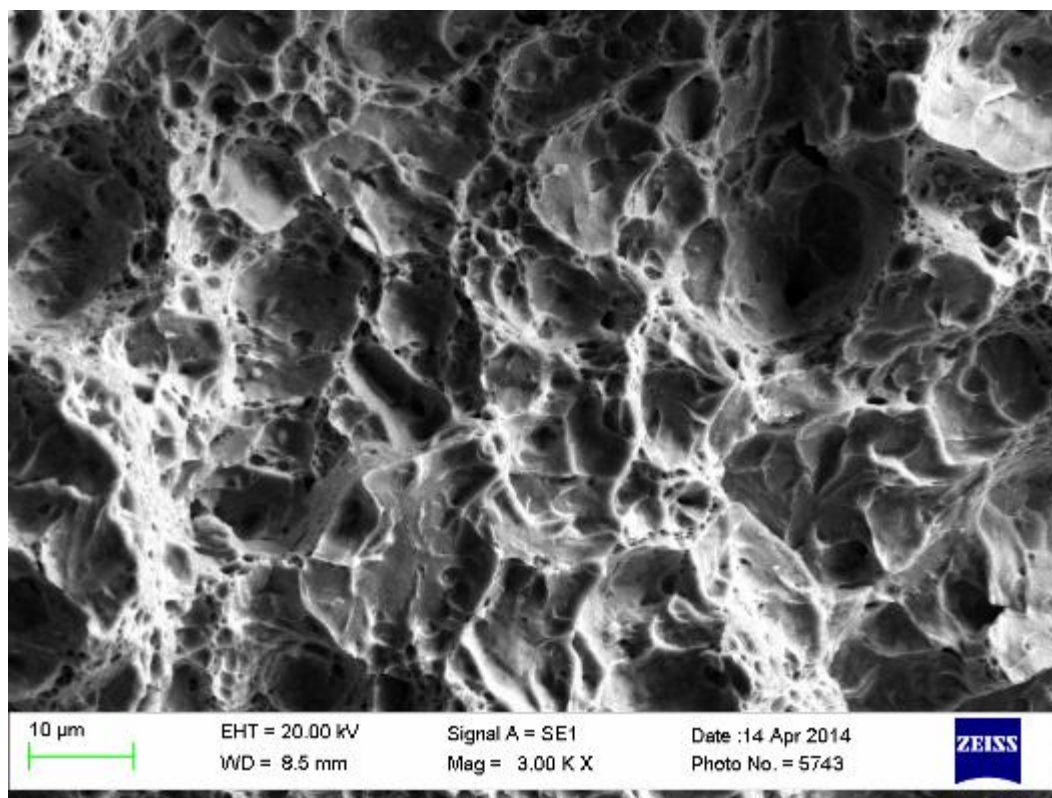


Рисунок 1.30 – Вязкий излом отожженной стали

Для хрупкого разрушения характерно распространение магистральной трещины после незначительной (менее 1-2%) пластической деформации, сосредоточенной в приповерхностной зоне трещины. При идеально хрупком разрушении можно заново составить тело прежних размеров из его частей, полученных в процессе разрушения, без зазоров между ними. Различают несколько видов хрупкого разрушения.

Транскристаллитное - происходит по определённым кристаллографическим плоскостям внутри зёрен (внутризёренное) разрушение. Транскристаллитное разрушение может реализоваться сколом и срезом, отличающихся видом поверхностей разрушения. Разрушение срезом не имеет кристаллографически выраженной направленности. Поверхность разрушения, как правило, серая и волнистая (рис. 1.31). Поверхность

разрушения при разрушении сколом — светлая и с выраженными границами кристаллов (рис. 1.32).

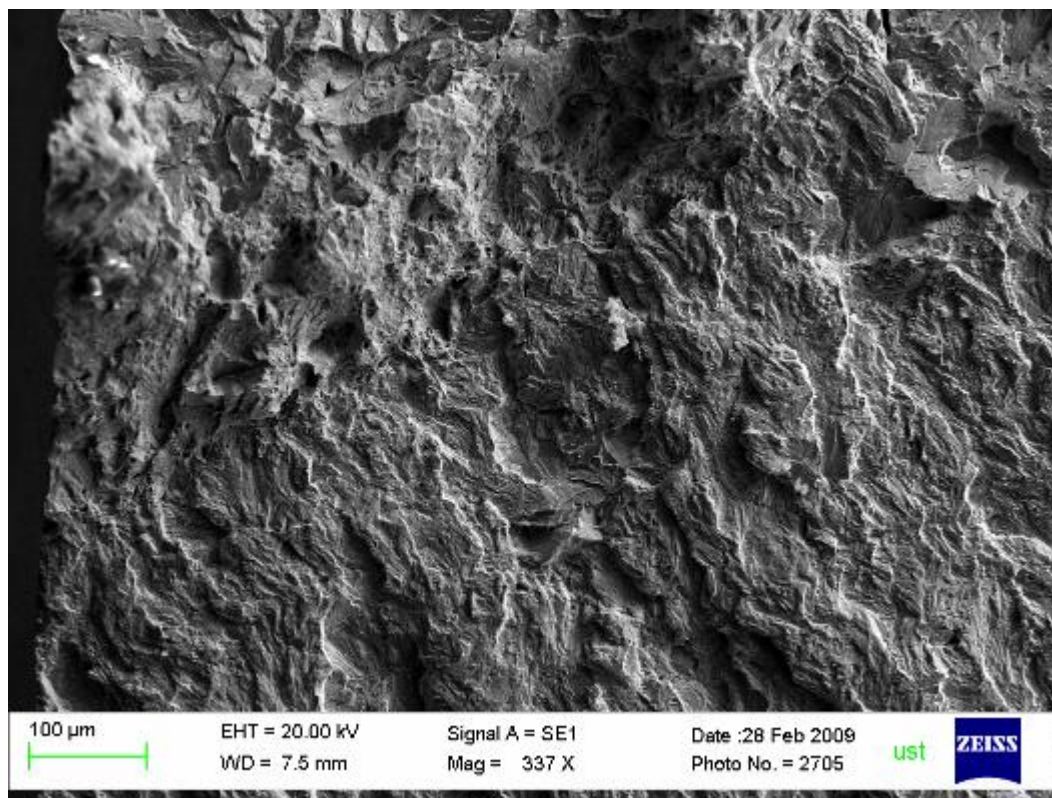


Рисунок 1.31 – Хрупкий излом при разрушении срезом

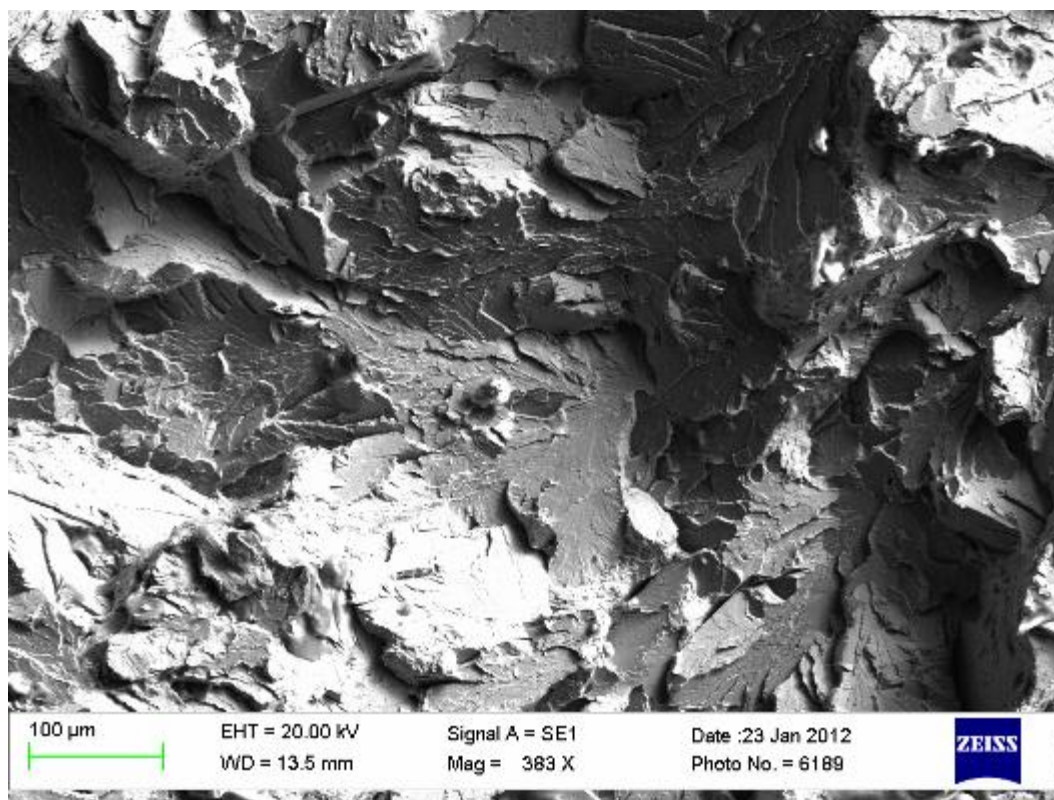


Рисунок 1.32 – Хрупкий излом при разрушении сколом

Интеркристаллитное (межзеренное) разрушение происходит при определённых условиях (низкие температуры, большое количество дисперсных фаз по границам зёрен или обогащение этих границ примесями, ослабляющими связи). Хрупкий излом при интеркристаллитном (межзеренном) разрушении показан на рис. 1.33. .

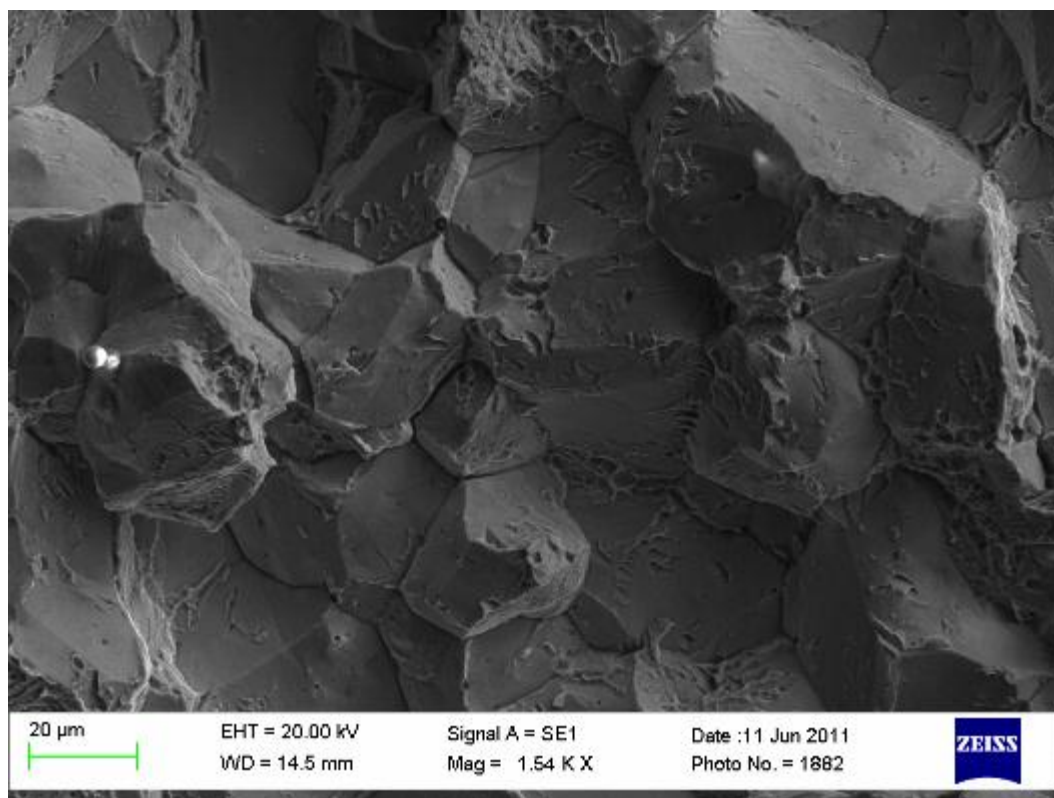


Рисунок 1.33 – Хрупкий излом при интеркристаллитном (межзеренном) разрушении

Квазихрупкое разрушение предполагает наличие пластической зоны перед краем трещины и наклёпанного материала у поверхности трещины. Излом показан на рис. 1.34.

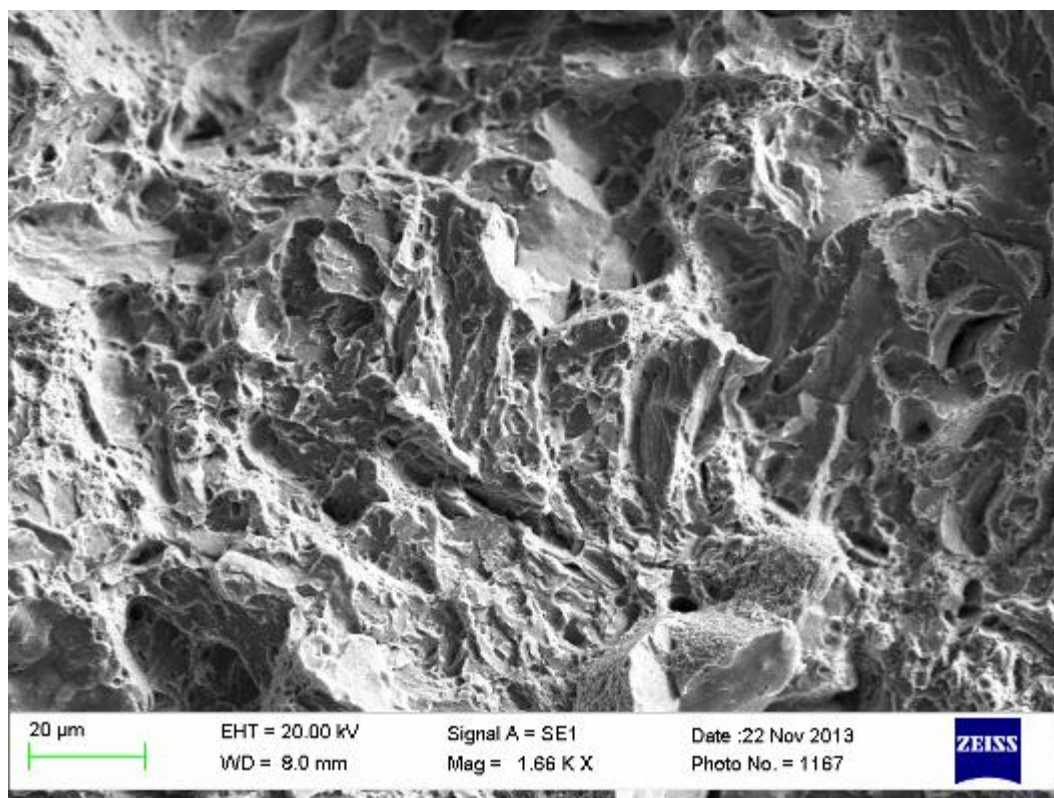


Рисунок 1.34 – Излом при квазихрупком разрушении

На рис 1.35. приведена обобщенная схема механизмов вязкого и хрупкого разрушения при разных температурах.

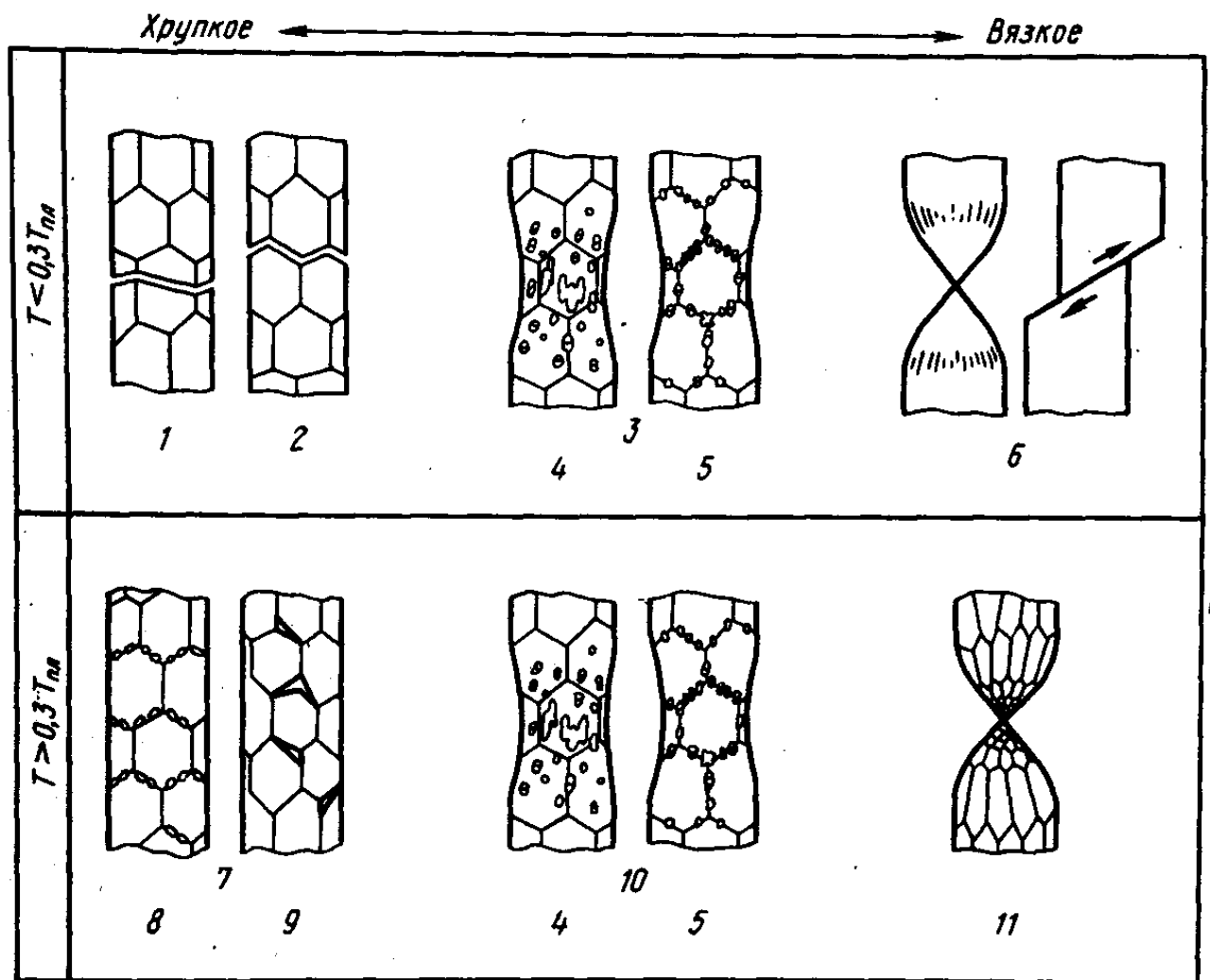


Рисунок 1.35 – Классификационная схема механизмов разрушения: 1-скол; 2 - хрупкое межзеренное разрушение; 3 -вязкий рост пор; 4 -внутризеренный рост пор; 5 -межзеренный рост пор; 6 - разрыв в результате пластического сужения или среза; 7 - межзеренная ползучесть (подробнее см. гл. 7); 8 - порообразование; 9 - клиновидные трещины; 10 - рост пор по механизму ползучести; 11-разрыв в результате сужения при динамическом возврате или рекристаллизации.

Усталостное разрушение (подробнее см. гл. 5) в отличие от вязкого и хрупкого происходит при циклическом нагружении, в результате накопления в материале необратимых повреждений, приводящих к

образованию и развитию трещины. Для излома при усталостном разрушении характерно наличие нескольких зон, где трещина распространяется с различной скоростью (рис. 1.36).

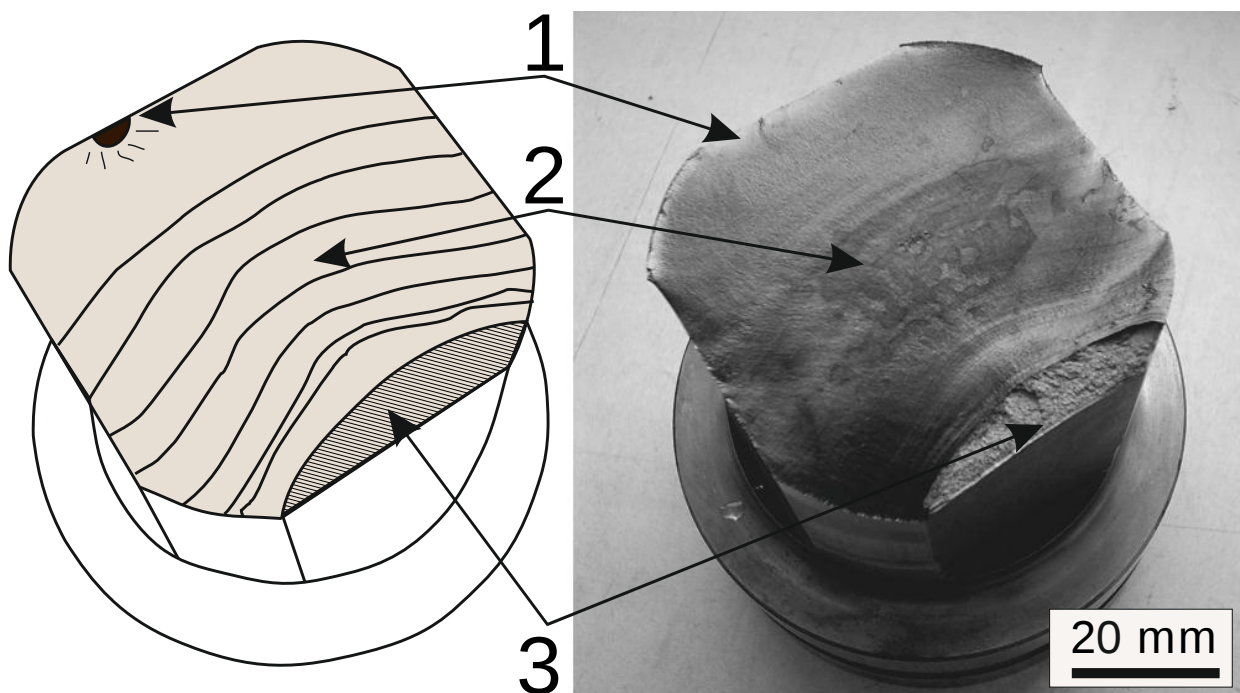


Рисунок 1.36 – Излом при усталостном разрушении

- 1- очаг разрушения – (место, где происходит зарождение усталостной микротрещины)
- 2- зона роста усталостной трещины
- 3- зона долома (быстрого разрушения)

Итак, при статическом нагружении процесс разрушения включает в себя две стадии: зарождение зародышевой трещины и ее распространение. По механизму зарождения трещин хрупкое и вязкое разрушение принципиально не различаются. Качественное различие между ними связано со скоростью распространения трещины. При хрупком разрушении эта скорость очень велика – она достигает 0,4...0,5 скорости звука в материале образца. В случае же вязкого разрушения трещина распространяется с относительно малой скоростью, соизмеримой со скоростью деформации образца.

1.5.4. Пути преодоления противоречия между повышением предела текучести и трещиностойкостью

Разработка новых методов упрочнения стали, от которых при повышенной прочности можно одновременно ожидать и высокое сопротивление хрупкому разрушению, стало в настоящее время одной из основных задач в материаловедении. Учитывая воздействие все возрастающих нагрузок в конструкциях требования к прочности стали заметно повысились. В ближайшем будущем ожидается широкое применение высокопрочных сталей.

Понятие «высокопрочная сталь» в разных случаях можно трактовать по разному. Если малоуглеродистая сталь с пределом текучести 700 МПа имеет феррито-перлитную структуру, то такую сталь можно считать высокопрочной. Но если указанный уровень прочности достигнут у высокоуглеродистой стали после закалки, то такую сталь нельзя отнести к высокопрочным.

В инженерных расчетах длительное время использовали лишь значения предела текучести и реже предела прочности. Учитывая изменения свойств материала в процессе эксплуатации и возможные перегрузки, расчетные рабочие напряжения большинства конструкций

принимали равной некоторой части (коэффициент надежности) от предела текучести или предела прочности.

Хрупкое, неожиданное разрушение конструкций до наступления предела текучести показало, что механические свойства, определенные на стандартных, гладких образцах, не всегда характеризуют поведение высокопрочного материала в рабочих условиях, так как не учитывают существование трещин, возникших при изготовлении или эксплуатации. Надежность работы детали в данном случае характеризуется сопротивлением материала распространению трещин, т. е. трещиностойкостью. Эта характеристика позволяет определить критические допустимые размеры трещины при определенной нагрузке.

При использовании упрочненных материалов расчет конструкций должен вестись с учетом не только предела текучести, но и разрушающего напряжения, которое можно определить, зная значение трещиностойкости.

Хрупкое разрушение может произойти при напряжениях, меньших предела текучести в следующих случаях:

- трещиностойкость материала достаточно мала;
- в объеме или на поверхности изделия имеется трещина (дефект) критического размера;

Основным критерием, по которому можно судить о целесообразности применения какого-либо метода упрочнения, является необходимость одновременного увеличения трещиностойкости или по крайней мере сохранения ее на прежнем уровне.

Накопленный к настоящему времени обширный экспериментальный материал дает возможность прийти к важному принципу любого упрочнения: повышение предела текучести не должно сопровождаться понижением трещиностойкости.

Анализируя достигнутые в последние годы достижения в материаловедении можно считать, что далеко не исчерпаны возможности дальнейшего повышения конструктивной прочности стали. Подтверждением этому служит изучение и развитие новых видов упрочняющих обработок. Для овладения рациональными методами повышения конструктивной прочности нужно учитывать тот факт, что сопротивление распространению трещин есть функция не абсолютных значений прочности, а структуры материала, т. е. важны пути, какими достигнут тот или иной уровень прочности. Следовательно, при выборе упрочняющей обработки необходимо располагать подробными сведениями о структуре материала и механизме упрочнения.

Как было показано выше, в общем случае задача повышения прочности материала достигается образованием различных препятствий-барьеров, затрудняющих движение дислокаций. Если дислокации скапливаются около прочного барьера, то у вершины этого плоского скопления возникают растягивающие напряжения. Эти напряжения с точки зрения большинства дислокационных теорий являются одной из главных причин зарождения трещины и хрупкого разрушения материала. Чем прочнее заблокированы дислокации, тем сильнее подавлены процессы макро- и микропластической деформации. Повышение трещиностойкости может быть достигнуто противоположным путем: развитием микро- и макропластической деформации, ускорением релаксационных процессов. Таким образом, для оптимального сочетания прочности и трещиностойкости структура сплава наряду с торможением движущихся дислокаций или их блокировкой (повышение сопротивления деформации) должна обладать способностью предотвращать опасность возникновения пиковых напряжений путем эстафетной передачи деформации в

соседние объемы (повышение трещиностойкости). Следовательно, дислокации в решетке металла должны быть и заторможены (высокий предел текучести) и подвижны (высокая трещиностойкость).

Склонность сплавов к хрупкости или пластичности целесообразно оценивать, рассматривая противоречие между пределом текучести σ_T и трещиностойкостью K_{Ic} по главной диаграмме конструктивной прочности материалов (рис.1.37.). На диаграмме показан возможный разброс σ_T и K_{Ic} , увеличивающийся с ростом прочности материала.

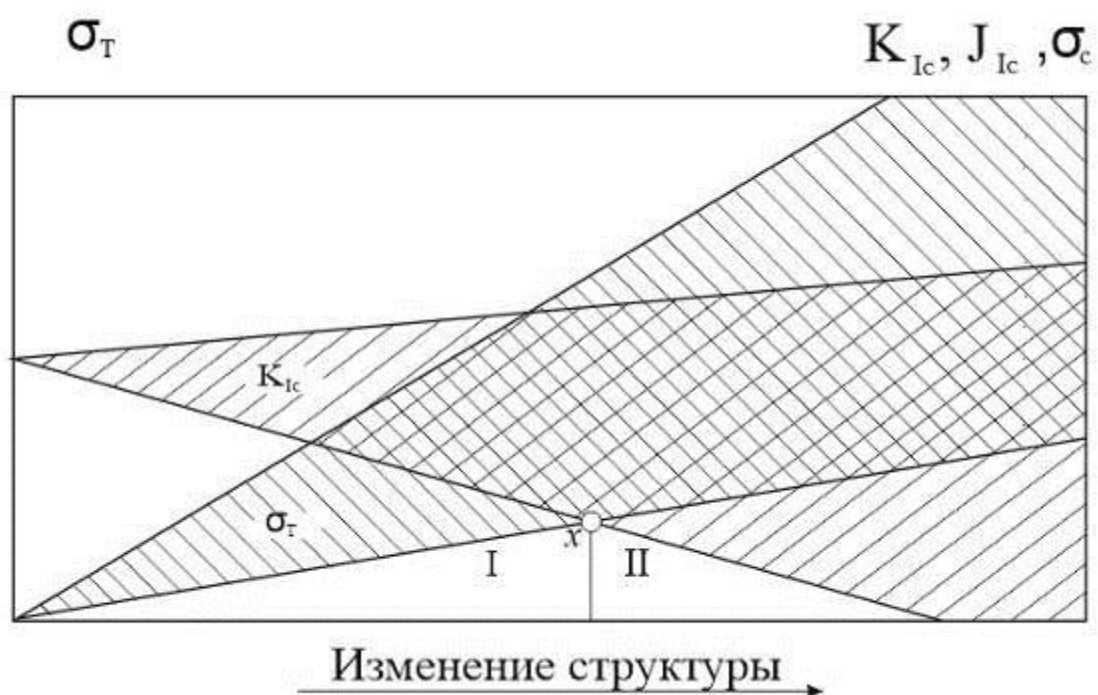


Рис 1.37 – Главная диаграмма конструктивной прочности материалов, тройная зависимость: предел текучести—трещиностойкость—изменение структуры (Л. И. Тушинский): I—область надежной работы изделий; II—область возможных внезапных разрушений; х—точка условного, относительного равновесия между σ_T и K_{Ic} .

Свойства (показатели), входящие в эту диаграмму: σ_T —предел текучести, или начало активного, множественного движения дислокаций и K_{Ic} —

трещиностойкость, или склонность к развитию хрупкой трещины от готового концентратора. Эти свойства определяют экспериментально и, следовательно, с учетом реального структурного состояния сплава. Условная точка x делит диаграмму на две области: I (высокой надежности) и II (повышенной хрупкости). Если сплав в соответствии со своим структурным состоянием располагается в области I, его служба безопасна, так как всякие случайные перегрузки будут сниматься активной пластической деформацией в связи с низкими значениями σ_T и высокими значениями K_{Ic} .

Если же сплав сильно упрочнен (созданы активные препятствия движущимся дислокациям), то значительно возрастает σ_T и снижается K_{Ic} . В этом случае всякий пик внешней нагрузки создает благоприятные условия для развития хрупкого разрушения. Для оценки возможности оптимального, эффективного упрочнения сплава, т.е. повышения предела текучести без снижения трещиностойкости (верхние границы кривых на рис. 1.37.) необходимо рассмотреть дислокационные механизмы повышения σ_T и сопоставить их с изменением K_{Ic} .

В терминах современной дислокационной теории пластической деформации и разрушения (структурной теории конструктивной прочности Л. И. Тушинского) предел текучести и уровень вязкости разрушения зависят от следующих членов уравнения:

$$\sigma_T, K_{Ic} = f(\sigma_P, \sigma_d, \sigma_p, \sigma_\phi, \sigma_z), \quad (1.3)$$

где: σ_P – сила Пайерлса-Набарро, напряжение трения кристаллической решетки, или напряжение, которое должна преодолеть движущаяся дислокация в решетке, свободной от каких либо препятствий. Экспериментально определить или вычислить это напряжение весьма сложно,

так как для этого необходимо получить сведения о свойствах не только кристаллической решетки матрицы, но и о самой дислокации (или тем более – многих дислокаций);

σ_d – упрочнение увеличением числа дислокаций, или напряжение сопротивления передвигающейся дислокации за счет других, расположенных на пути её движения. Количественно это напряжение определяется энергией взаимодействия дислокаций в металле, как беспорядочно расположенных в виде «леса», ($\sigma_{д.л}$), так и регулярно расположенных в виде субграниц полигонов, ячеек ($\sigma_{д.п.я}$):

$$\sigma_d = \sigma_{д.л} + \sigma_{д.п.я} ; \quad (1.4)$$

σ_p – упрочнение растворенными атомами. Стартовое напряжение дислокаций или напряжение течения в твердых растворах выше, чем в чистых металлах, потому, что при легировании создаются затруднения в перемещении любой дислокации либо из-за её упругого взаимодействия с искаженной кристаллической решеткой матрицы, либо за счет блокировки этой дислокации атмосферами атомов растворенного элемента:

$$\sigma_p = \sigma_{р.бесп} + \sigma_{р.атм} ; \quad (1.5)$$

σ_ϕ – упрочнение дисперсными фазами, состоящее из трех возможных моделей:

$$\sigma_\phi = \sigma_{\phi.ор} + \sigma_{\phi.х} + \sigma_{\phi.н.м.}, \quad (1.6)$$

где:

$\sigma_{\phi,Op}$ – упрочнение за счет взаимодействия движущихся дислокаций с прочными недеформирующимися частицами, с образованием дислокационных петель по механизму Орована.

$\sigma_{\phi,X}$ – упрочнение за счет образования дислокационных петель и спиралей по механизму Хирша при пластическом деформировании сплава, содержащего прочные частицы;

$\sigma_{\phi,Н.М}$ – упрочнение за счет перерезания деформируемых частиц движущимися дислокациями по механизму Николсона-Мотта;

σ_3 – упрочнение микроструктурными барьерами на пути движущихся дислокаций в виде границ зерен, границ двух фаз, узких прослоек второй фазы. Большинство расчетов этого вклада основывается на известном уравнении Холла-Петча. (см. 1.2)

Только два дислокационных механизма полностью удовлетворяют условиям повышения конструктивной прочности промышленных сталей. Это субструктурное упрочнение $\sigma_{д.п.я}$, реализуемое созданием полигонально-ячеистых дислокационных построений, и σ_3 – упрочнение микроструктурными барьерами (границами зерен).

По этим дислокационным моделям можно повышать предел текучести сплава без опасений его охрупчивания. Именно эти два механизма эффективны для совершенствования известных и создания новых технологических процессов упрочняющей обработки металлов, таких как регулируемое термопластическое упрочнение (РТПУ), контролируемая прокатка и др. Для данных технологий приходится специально создавать такие условия, которые способствуют снижению влияния других, неблагоприятных дислокационных механизмов.

Если изделие конструируется по принципу композиционного материала с реализацией комбинированного упрочнения – объемного и поверхностного, то открываются возможности успешного использования всех дислокационных механизмов упрочнения: $\sigma_{д.п.я.}$ и σ_z – для объемного упрочнения, $\sigma_{д.л.}$, $\sigma_{п.}$, $\sigma_{ф.}$, $\sigma_{р.}$ – для поверхностного при нанесении покрытий. Такой новый подход к упрочнению различных металлических изделий (развитие принципа комбинированного упрочнения) позволяет по-новому рассматривать и всю проблему покрытий в целом. С этих позиций покрытия рационально применять не только для восстановления изношенных поверхностей, но и главным образом при производстве новых деталей машин, работающих в условиях изнашивания.

Список литературы

1. Агамиров Л.В., Алимов М.А., Бабичев Л.П., Бакиров М.Б. Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. Том II-1. Материалы в машиностроении: Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. – М.: Машиностроение, 2010. - 952 с.
2. Алехин В.П., Белый А.В., Беляев С.П., Панин С.В. Актуальные проблемы прочности. - Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2010. - 435 с.
3. Батаев А.А., Батаев В. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение. Учебное пособие - : Новосибирск: НГТУ, 2002. - 383 с.
4. Батаев В.А. Методы структурного анализа материалов и контроля качества деталей : Учебное пособие / В.А. Батаев, А.А. Батаев, А.П. Алхимов. - 2-е изд. - М. : Флинта : Наука, 2007. - 224 с.

5. Батаев В.А., Батаева З. Б. Материалы с нанокристаллической структурой. Учебное пособие -: Новосибирск: НГТУ, 2007. - 264 с.
6. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. - М.: Металлургия, 1979. - 496 с.
7. Владимиров В.И., Романов А.Е. Дисклинации в кристаллах. - Л.: Наука, 1986. - 223 с.
8. Гольцев В.Ю. Методы механических испытаний и механические свойства материалов: учебное пособие для вузов. - М.: Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт», 2012. - 228 с.
9. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. - М.: Металлургия. 1983. - 352 с.
10. Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика и прогнозы будущего. - М.: Наука, 1997. - 285 с.
11. Лопатина Е.С., Ковалева А.А., Аникина В.И. Механические свойства металлов. Курс лекций. - Красноярск: СФУ, 2008. – 192 с.
12. Марущак П.О., Панин С.В., Студент А.З., Овечкин Б.Б. Масштабные уровни деформации и разрушения теплостойких сталей. - Томск: Изд-во Национального исследовательского Томского политехнического университета, 2013. - 236 с.
13. Москвичев В.В., Махутов Н.А, Черняев А.П. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов. - Новосибирск: Наука, 2002. - 334 с.
14. Новиков И.И. Дефекты кристаллического строения металлов. - М.: Металлургия, 1975. - 208 с.

- 15.Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Макаров П.В. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. - Новосибирск: Наука, 1995. - 618 с.
- 16.Плохов А. В., Попелюх А. И., Веселов С. В., Тюрин А. Г., Никулина А. А. Исследование конструктивной прочности материалов после комбинированного упрочнения и специальных видов сварки. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. -392 с.
- 17.Терентьев В.Ф., Колмаков А.Г. Механические свойства металлических материалов Учебное пособие. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. - 120 с.
- 18.Тушинский Л.И. Теория и технология упрочнения металлических сплавов. - Новосибирск: Наука, 1990. - 306 с.
- 19.Тушинский Л.И. Структурная теория конструктивной прочности материалов. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. - 400 с.
- 20.Тушинский Л. И.,Батаев А. А., Тихомирова Л. Б.Структура перлита и конструктивная прочность стали : монография. - : ВО \"Наука\", Новосибирск, 1993. - 280 с.
- 21.Tushinsky L., Kovensky I., Plokhov A., Sindeev V., Rechedko P. Coated Metal. Structure and Properties of Metal Coating Compositions. - Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2002. – 458 p.

Глава 2. Физические свойства материалов

Физические свойства - свойства, обусловленные физической природой веществ, а также физическими явлениями, происходящими в них. В отличие от механических свойств физические обычно можно измерять и исследовать без деформации и разрушения образцов. Микро-, мезо- и макродефекты кристаллического строения реального материала, дефекты упаковки, границы зерен, остаточные напряжения оказывают влияние на физические свойства. С известным приближением большинство физических свойств можно считать структурно-чувствительными.

Наиболее важные физические свойства вещества: температуры плавления и кипения, теплоемкость, энтальпия, теплопроводность, плотность, термическое расширение, К физическим относят также группы свойств: оптические, полупроводниковые, магнитные, термоэлектрические и др. В последнее время в связи с интенсивными исследованиями порошковых материалов и керамик большое внимание уделяется пористости, проницаемости жидкости и газов.

В настоящей книге, исходя из научных направлений и интересов кафедры и тем научно исследовательских работ студентов, авторы представили ограниченное количество физических свойств. Причем, основные выводы теории, а также влияние структуры и состава материала на эти свойства рассмотрели с неодинаковой полнотой, определяемой научной деятельностью и исследовательской работой практика-материаловеда.

2.1 Плотность

2.1.1. Понятия и определения

Плотность - физическая характеристика материала, определяемая отношением его массы к занимаемому объёму. В зависимости от того, что принимается в качестве объёма, различают несколько видов плотностей.

За *истинную плотность* принимают величину, представляющую отношение массы тела m к объёму его компактной непористой основы V_r :

$$\rho_u = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Истинная плотность является фундаментальной характеристикой твёрдых тел при данной температуре. Ее действительные значения можно оценить только для кристаллических тел известного состава с привлечением надёжных рентгеноструктурных данных для расчёта параметров кристаллической решётки при условии, что её дефектами можно пренебречь. Поэтому истинную плотность часто называют также рентгеноструктурной или теоретической.

Для пористых материалов аморфного или кристаллического строения расчёт истинной плотности по рентгеноструктурным данным невозможен, а другие методы измерения плотности дают значения, только в той или иной степени, приближающиеся к значению ρ_u .

При нагревании металлов и сплавов имеет место непрерывное увеличение их объёма и, следовательно, уменьшение плотности. Объём меняется скачкообразно или постепенно при фазовых превращениях, а при плавлении или аллотропических превращениях - скачкообразно. Пластическая деформация литых металлов и сплавов при высоких температурах сопровождается ростом плотности, так как при этом уменьшается пористость. Холодная деформация также увеличивает плотность, но лишь при степенях деформации меньших 10%. Дальнейший рост деформации сопровождается понижением плотности из-за резкого увеличения количества линейных дефектов кристаллического строения—дислокаций.

У железоуглеродистых сплавов при одинаковом содержании углерода минимальная плотность характерна для мартенсита, а максимальная - для аустенита. При отпуске закалённой стали имеют место четыре превращения,

сопровождающиеся изменением объёма и плотности. Причём, при распаде мартенсита объём стали уменьшается, а полиморфное превращение аустенита в мартенсит сопровождается ростом объёма.

Плотность пористого тела, рассчитанную с учётом его общего объёма V , включающего и твёрдый остов и поры, называют кажущейся плотностью:

$$\rho_k = \frac{m}{V} \quad (2.2)$$

Кажущаяся плотность - есть структурно-чувствительная характеристика, зависящая от совершенства внутренней структуры материала. Рентгеноструктурная плотность металлов и сплавов всегда больше, чем кажущаяся, из-за наличия в реальном материале пор и несовершенств кристаллического строения. Кажущаяся плотность порошковых изделий составляет 60–90 % от плотности компактного аналогического материала. Это обусловлено возникновением пор, образованием оксидов, фазовыми превращениями и другими физико-химическими явлениями, сопутствующими технологии.

Плотность часто измеряют с помощью пикнометрических жидкостей, заполняющих поровое пространство. Поскольку экспериментальные значения этой плотности во многом зависят от свойств пикнометрического вещества, в частности от его способности проникать в поры, то эту плотность называют *пикнометрической плотностью*.

Знание пикнометрической и кажущейся плотностей необходимо для вычисления общей пористости порошковых материалов, а также для анализа химических и фазовых превращений, сопровождающих современные технологии и эксплуатацию изделий.

Плотность порошковых материалов также как и их пористость измеряют по отечественным и международным стандартам ГОСТ 18898 и ISO 2738. Эти нормативные документы регламентируют следующие методы: гидростатического взвешивания и пикнометрический.

Самым точным методом измерения является флотационный. Он заключается в сравнении плотности образца с плотностью рабочей жидкости в момент перехода образца во взвешенное состояние. Чувствительность метода - $1/1000 \text{ г/см}^3$. Применение метода возможно лишь для материалов с плотностью меньшей $4,0 \text{ г/см}^3$. Именно с такой максимальной плотностью известны рабочие флотационные жидкости. Поэтому метод применяется в основном для лёгких материалов

Сущность простого и оперативного метода обмера и взвешивания заключается в измерении штангенциркулем и весами размеров и массы образца и вычислении плотности. Метод обладает малой точностью измерения - до 0,5%. Плотность качественно можно оценить также на поперечном шлифе по количеству видимых пор.

Рассмотрим подробнее распространённые стандартные методы гидростатического взвешивания и пикнометрический.

2.1.2. Метод гидростатического взвешивания

Метод гидростатического взвешивания заключается в том, что образец взвешивают сначала на воздухе, а затем в смачивающей его, но не реагирующей с ним жидкости и на основании результатов вычисляют кажущуюся плотность. Масса образца должна быть не менее 5 г; изготавливают не менее трёх параллельных образцов. Образцы высушивают в сушильном шкафу при температуре $110\text{--}135^\circ\text{C}$. Массу образца считают постоянной, если результат последующего взвешивания, проведенного через один час сушки, отличается от предыдущего не более чем на 0,1%. При отсутствии в лаборатории стандартной влажности, образцы помещают в эксикатор и вынимают из него поочерёдно, непосредственно перед взвешиванием.

Взвешивать рекомендуется на лабораторных аналитических весах. По методу уравновешивающего момента используют коромысловые или квадрантные весы. Весы должны иметь специальные приспособления для

гидростатического взвешивания. Для квадрантных и коромысловых весов можно использовать следующие схемы (рис. 2.1). В коромысловых весах одна из чашек устанавливается на укороченной серьге 7, к чашке крепится тонкая, изготовленная из нержавеющей стали, нить подвеса 3. Укороченная серьга, нить подвеса и чашка уравнивается на нулевое положение шкалы.

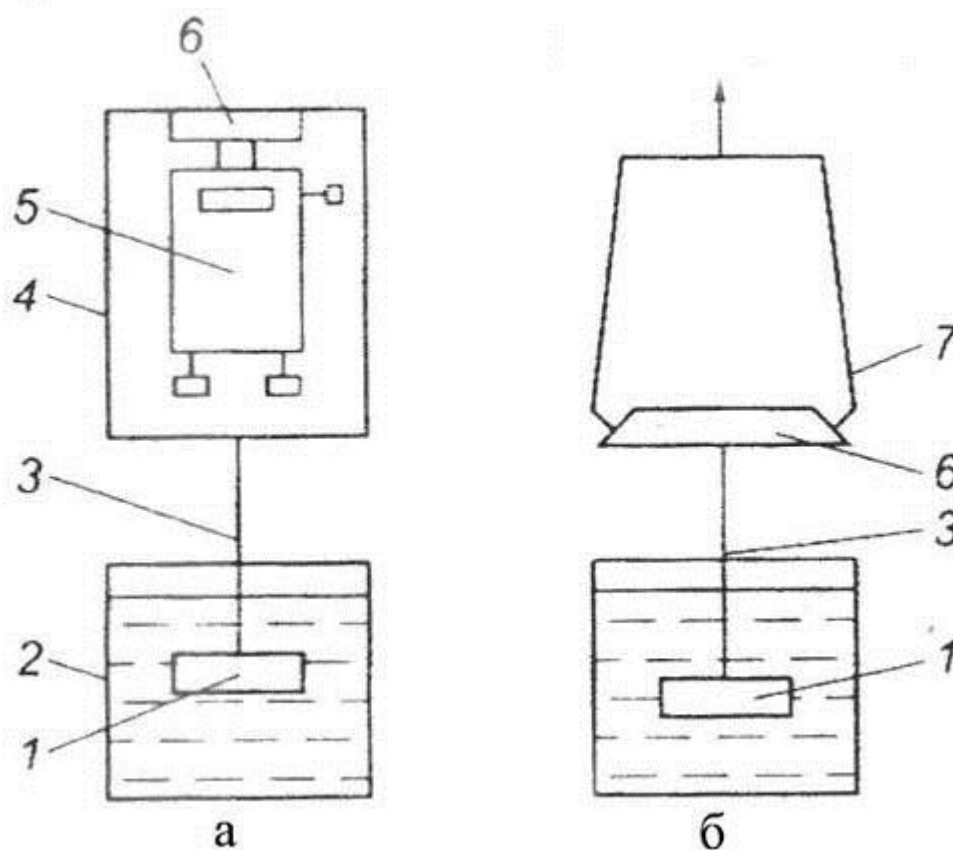


Рисунок 2.1 – Схема устройств для гидростатического взвешивания с укорочением серьги весов: а - с использованием квадрантных весов; б – с использованием коромысловых весов; 1-покрытие; 2-цилиндр для гидростатического взвешивания; 3-нить подвеса; 4-рамка подвеса; 5-квадрантные весы; 6-чашка весов; 7-укороченная серьга.

Возможны также взвешивания и без укорочения серьги. Подставку под цилиндр 3 (рис. 2.2) устанавливают так, чтобы чашка весов свободно передвигалась вниз и вверх. При нижнем расположении цилиндра (рис. 7.48, б) к одной из чашек снизу прикрепляют крючок, к которому привязывают нить подвеса, свободно проходящую через отверстие в основании витрины весов и в столе. Крючок и нить подвеса уравнивают грузом, помещенным на другую чашку.

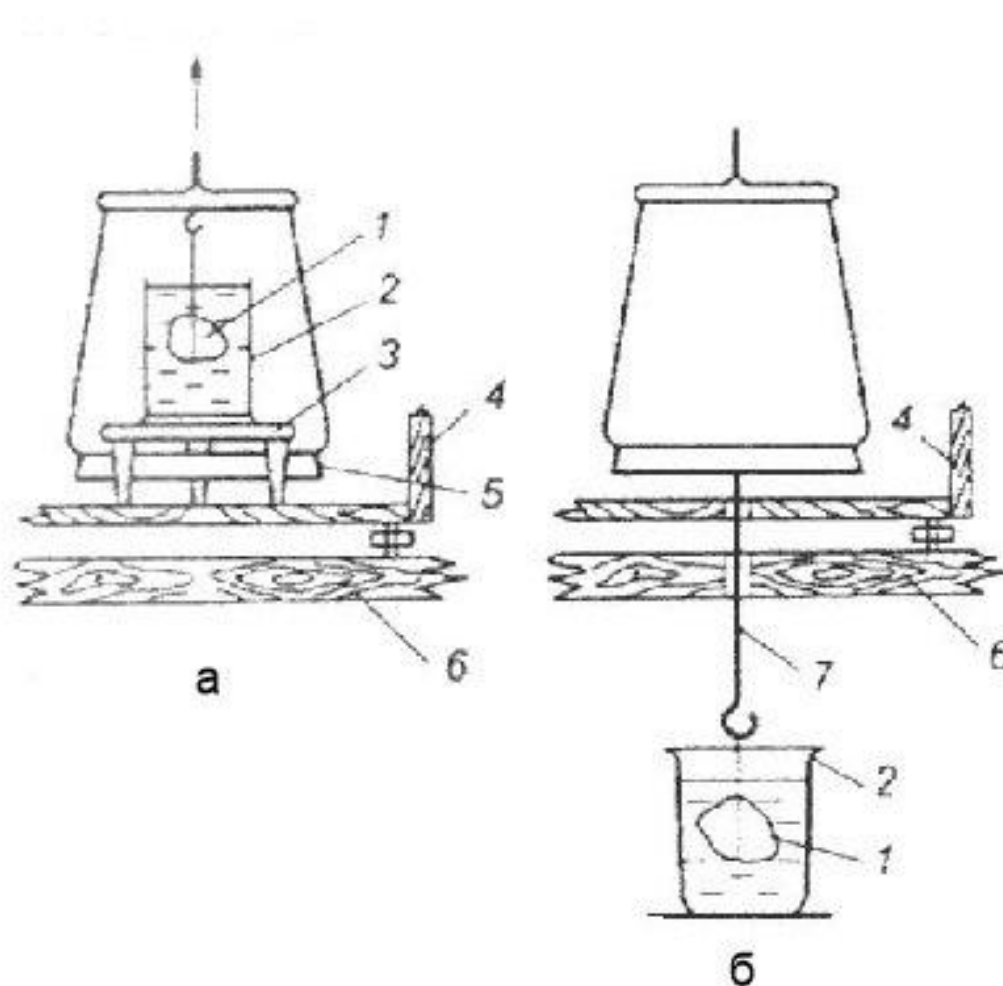


Рисунок 2.2 – Устройство для гидростатического взвешивания без укорочения серьги весов. Цилиндр с жидкостью расположен относительно чашек весов: а - выше; б - ниже. 1-покрытие; 2-цилиндр с жидкостью; 3-подставка; 4-витрина весов; 5-чашка; 6-крышка стола; 7- крючок

В массовых лабораторных измерениях плотности целесообразно использовать специализированную аппаратуру. Весы с одной призмой и коромыслом, имеющим на одном плече поплавок в жидкой среде, а на другом - противовес, получили название гидростатических, или весов Мора-Вестфаля (рис. 2.3).

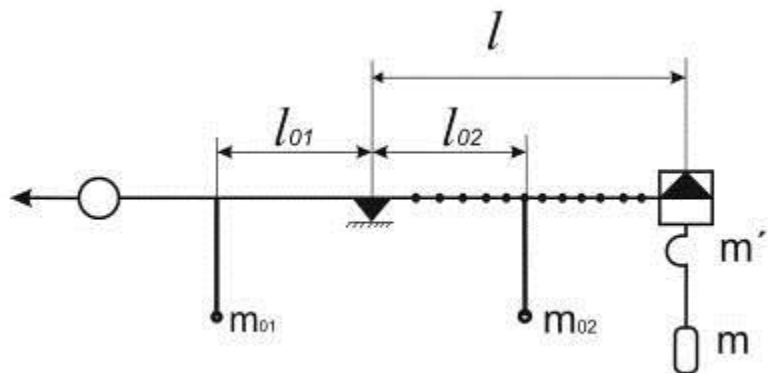


Рисунок 2.3 – Схема гидростатических весов: m - масса поплавка, m' - масса серьги с подвешенной к ней проволокой, m_{02} - масса правого плеча коромысла, l - длина правого плеча коромысла до серьги, l_{02} - длина правого плеча коромысла, l_{01} - длина левого плеча коромысла с противовесом, m_{01} - масса левого плеча коромысла с противовесом.

Являясь простым по конструкции прибором, эти весы дают возможность быстро и легко взвесить образцы в рабочей жидкости.

Стандартные испытания включают следующие последовательные основные операции: взвешивание образца на воздухе, закрытие поверхностных пор, взвешивание образца с закрытыми порами в воде.

Сначала образцы поочерёдно вынимают из эксикатора и взвешивают на воздухе. Поверхностные поры закрывают парафином, тонким слоем лака или вазелина. При парафинировании образцы, предварительно высушенные и нагретые до $50-60^{\circ}\text{C}$, на тонкой нити погружают в расплавленный парафин, так чтобы после охлаждения вся поверхность образца была покрыта тонким слоем парафина. После погружения в лак и удаления избытков лака, образец

выдерживают в сушильном шкафу при температуре 50–60⁰С в течение 10–15 мин. Вазелин сначала наносят на поверхность тонким слоем, а затем втирают в поверхностные поры. Образцы с закрытыми поверхностными порами закрепляют нитью подвеса и взвешивают в воде, причём выделения пузырьков воздуха при взвешивании не допускается.

Кажущуюся плотность (ρ_k) в г/см³ вычисляют по формуле:

$$\rho_k = \frac{\rho_v m_1}{m_2 - m_3} \quad (2.3)$$

где m_1 —масса образца, взвешенного на воздухе, г;

m_2 — масса образца с закрытыми поверхностными порами, взвешенного на воздухе, г;

m_3 —масса образца с закрытыми поверхностными порами, взвешенного в воде, г;

ρ_v —плотность воды при температуре испытаний, г/см³.

В этой формуле масса материала, применяемого для закрытия поверхностных пор, не учитывается вследствие малости. Ошибка при измерении плотности тем выше, чем больше отношение площади поверхности образца к его объёму.

Метод гидростатического взвешивания в сравнении с пикнометрическим более прост и оперативен. Однако, он менее точен (обеспечивает точность измерения плотности до 0,1%) и имеет меньшую воспроизводимость.

2.1.3.Пикнометрический метод

Сущность пикнометрического метода состоит в том, что образец (порошковое изделие) помещают в пикнометр (сосуд определённой вместимости) вместе с ним взвешивают, затем оставшийся объём заполняют пикнометрической жидкостью и повторно взвешивают и на основании полученных результатов рассчитывают плотность. Плотность определяют,

измеряя массу и объем пробы порошкового материала после его дробления и измельчения до такой степени, чтобы не оставалось закрытых пор.

Для массовых измерений обычно используют колбообразные стеклянные пикнометры шаровидной формы, которые закрываются либо глухой притёртой пробкой, либо притёртой пробкой с капиллярным отверстием. Наилучшие результаты получают, используя пикнометры вместимостью 25–100 мл.

При испытаниях следует использовать пикнометрические жидкости, которые не реагируют с материалом образца, хорошо смачивают его, имеют малый коэффициент динамической вязкости, низкие значения поверхностного натяжения и упругости пара. Рекомендуется применять ксилол, толуол, керосин, этиловый спирт.

Предварительно раздробленный и просеянный порошок из материала образца высушивают при 110–135⁰С в течение 2ч и хранят в эксикаторе. Чистый, сухой пикнометр, масса которого была определена ранее, наполняют пикнометрической жидкостью до метки, закрывают пробкой и взвешивают. Затем жидкость выливают, пикнометр тщательно промывают и вновь сушат. После охлаждения пикнометра в него насыпают вынутый из эксикатора порошок. Далее пикнометр с навеской закрывают пробкой и взвешивают. Затем в пикнометр заливают жидкость примерно до половины его объёма. Доливать жидкость до метки следует только после пропитки открытых пор, т.е. после окончания выделения воздуха. Затем пикнометр закрывают пробкой и взвешивают вновь.

Пикнометрическая плотность материала ρ_{Π} (г/см³) подсчитывают по формуле:

$$\rho_{\Pi} = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1) - (m_4 - m_3)} \quad (2.4)$$

$$\rho_{\text{ж}} = \frac{m_2 - m_1}{V_{\text{пик}}}, \quad (2.5)$$

где m_1 —масса пустого пикнометра, г;
 m_2 —масса пикнометра с пикнометрической жидкостью, г;
 m_3 —масса пикнометра с порошком, г;
 m_4 —масса пикнометра с порошком и пикнометрической жидкостью, г;
 $\rho_{ж}$ — плотность пикнометрической жидкости при температуре испытаний, г/см³;

$V_{пик}$ —объём пикнометра, см³;

Метод обеспечивает точность измерения до 0,05%. Если в испытуемом порошке сохранились закрытые поры или недостаточно полно пропитаны открытые поры, то при определении пикнометрической плотности допускается систематическая ошибка.

2.2 Пористость

2.2.1. Понятия и определения

Пористость--одна из важных характеристик, которые определяют эксплуатационные свойства литейных сплавов, керамик, порошковых изделий, катализаторов, теплоизолирующих и строительных материалов.

В публикациях наблюдается противоречивость специальных терминов касающихся пористости. Единая терминология поможет обмену технической и научной информацией по новой технологии. Это тем более важно, что контроль и требования к пористости всегда устанавливают в нормативно-технической документации на конкретные изделия. Ниже приведена базовая терминология и определения, сформулированные нами по отечественным и международным стандартам.

Поры - несплошности в объёме материала.

Открытая пористость - пористость, обусловленная порами, выходящими на наружную поверхность образца. Обычно она характерна для материалов, общая пористость которых превышает 10% и способных

пропускать жидкости и газы. Открытые поры могут быть тупиковыми, сообщающимися и сквозными.

Закрытая пористость - пористость, обусловленная порами, не сообщающимися с наружной поверхностью. Закрытую пористость вычисляют как разность между общей и открытой пористостью.

Общая пористость - отношение суммарного объёма открытых и закрытых пор материала к его объёму. Общая пористость конструкционных материалов является регулируемой величиной и находится в диапазоне: практически беспористая (менее 1%) - 50%.

Сквозные поры - открытые поры, каждая из которых имеет два выхода на наружную поверхность образца. В ISO 10308 сквозные поры в покрытиях классифицируют на вертикальные, наклонные, искривлённые и разветвлённые.

Сообщающиеся поры (связанные поры) - закрытые или открытые поры, соединённые между собой или с внешней поверхностью.

Тупиковые поры - открытые поры, которые имеют только один выход на наружную поверхность пористого тела.

В порошковой металлургии условно различают низко-, средне- и высокопористые материалы. К низкопористым относят материалы, пористость которых не превышает 30%, у среднепористых она находится в интервале 30 – 50%, у высокопористых превышает 50%.

Предлагается классификация пор в порошковых материалах и газотермических покрытиях, отличающихся по форме, положению в пространстве (локации), размерам, природе и месту образования (рис.2.4).



Рисунок 2.4 – Классификация пор в порошковых материалах и газотермических покрытиях

Форма пор в порошковых изделиях достаточно разнообразна. Различают (рис. 2.5) гипоциклоиду с тремя или четырьмя ветвями, круг, эллипс с разным соотношением осей, эллипс с талией, концы разветвлённых пор могут быть закруглённые или острые.

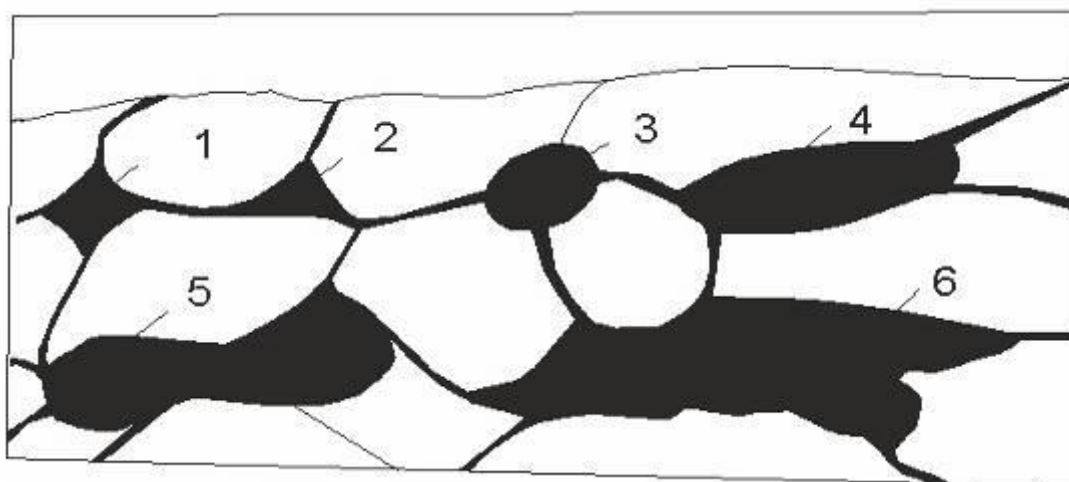


Рис. 2.5 - Форма пор в порошковом материале: 1 - гипоциклоида с четырьмя ветвями; 2 - гипоциклоида с тремя ветвями; 3 – круг; 4 – эллипс; 5 - эллипс с талией; 6 - неправильная с разветвлёнными краями.

Сравнительно правильную форму пор и их равномерное распределение получают в порошковых изделиях при использовании мелких сферических порошков. Неправильную форму пор с разветвлёнными краями наблюдают при формировании изделия из крупных порошков. Обычно в одном образце имеются поры разных форм и величин со стенками гладкими или шероховатыми.

При прочих равных условиях, чем крупнее исходные порошки и больше общая пористость, тем сильнее форма пор отличается от равноосной. При большой пористости материала поры обычно в виде венчика окружают частицы, в более плотных материалах они сравнительно равномерно распределены в объёме и отделены друг от друга.

По месту образования поры в газотермических покрытиях подразделяют на: сформировавшиеся внутри частиц, по границам между частицами, по границам между слоями, в граничной области покрытие - основной металл. Пространственное расположение пор показано на рис. 2.6.

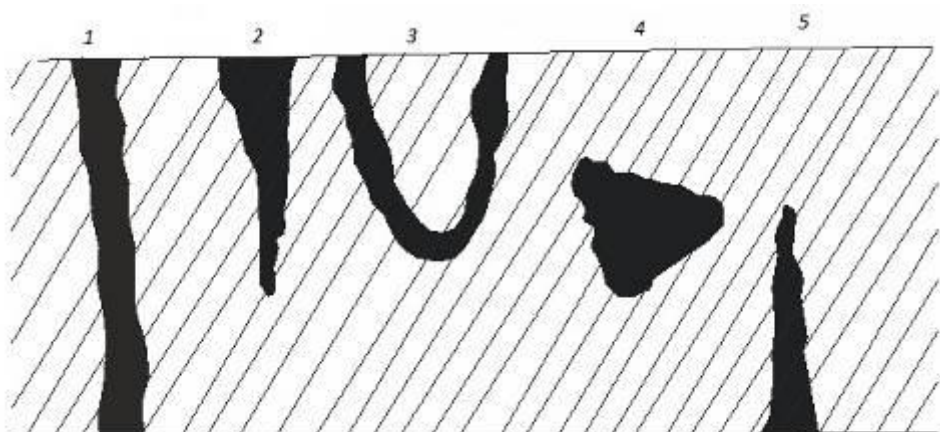


Рис. 2.6 - Пространственное расположение пор в покрытии: 1 – открытая, сквозная до основного металла; 2 - открытая тупиковая; 3 -

открытая сообщающаяся; 4 – закрытая; 5 - закрытая, доходящая до основного металла.

В порошковой металлургии поры распределяют по размерам на макропоры (> 40 мкм), мезопоры ($2 - 40$ мкм) и микропоры (< 2 мкм). В исследовании свойств углеродных наноматериалов используют другую классификацию: макропоры - более 200 нм; мезопоры - 1,6 – 200 нм; микропоры - менее 1,6 нм. Такая сверхтонкая градация обусловлена особенностями адсорбционных свойств пористых наноматериалов.

Для порошковых покрытий наиболее приемлема следующая классификация:

- *макропоры* - поры, различимые невооружённым глазом, имеющие размеры более 0,1 мм;

- *мезопоры* - поры, различимые на оптическом микроскопе, имеющие размеры от сотен до единиц микрометров (в последнем случае на пределе разрешения прибора);

- *микро* (нано) поры - поры, выявляемые на электронных микроскопах, и имеющие размеры менее 100 нм.

Ясно, что классификация пор по размерам в зависимости от изучения пористой структуры невооружённым глазом, оптическим или электронным микроскопом, достаточно условна.

При одинаковой пористости в материале может находиться небольшое число крупных пор или значительное количество мелких.

Для количественной характеристики отдельных пор используют понятия максимального и минимального размера (рис. 2.7), распределение пор по размерам, коэффициент извилистости пор.

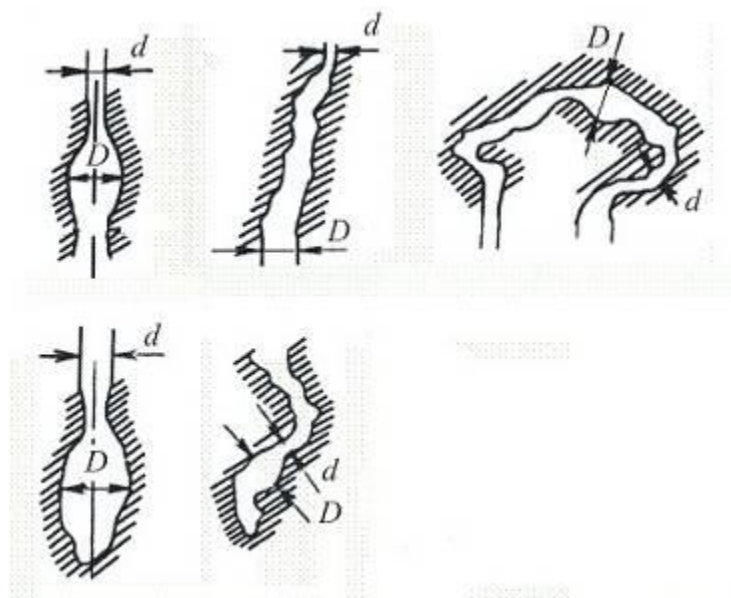


Рисунок 2.7 – Размеры пор: D и d – максимальный и минимальный диаметры пор

Минимальные размеры сквозных пор являются важной характеристикой материала, так как определяют максимальный размер частиц, которые могут пройти через него при фильтрации. Средние размеры пор обычно используют для сравнения порошковых материалов. Распределение пор по размерам даёт представление о числе или объёме пор каждого размера, диапазоне изменения размеров пор и является более полной характеристикой по сравнению с максимальными и средними размерами. Коэффициент извилистости пор ν определяется как отношение длины поры H_n к длине прямой, соединяющей концы пористого канала H :

$$\nu = \frac{H_n}{H} \quad (2.6)$$

Характер пористой структуры материалов определяется размерно-геометрическими факторами. Различают регулярные пористые структуры с правильно чередующимися элементами в виде отдельных пор и соединяющих их каналов. В нерегулярных пористых материалах размеры пор или их ансамблей, взаимное расположение и связь пор случайны. Для таких структур характерен набор всевозможных пор, отличающихся кроме

размеров, также формой, происхождением, положением в пространстве, типом связности и др. Особенности геометрии и пространственного расположения пор составляют основу для геометрического моделирования пористых структур.

Поры в материалах делают их структуру и свойства отличными от монолитных аналогов того же состава или даже приводят к возникновению новых свойств. Согласно М. Ю. Бальшина пористое, порошковое тело в первом приближении является двухфазной объёмно-пространственной конструкцией, которая состоит из твёрдого каркаса и пор, заполненных воздухом. Безразмерные свойства пористого тела C/C_k (где C - свойство пористого тела, отнесённое к его номинальным параметрам, например, к номинальному сечению или длине, C_k - свойство компактного тела) являются масштабом M искажения данного свойства в пористом теле ($C/C_k = M$, $C = MC_k$). Определив масштаб какого-либо из свойств пористого образца, можно рассчитать для него с десяток других характеристик.

В общем случае влияние пористости на относительную прочность порошковой керамики показано на **рис. 2.8**.

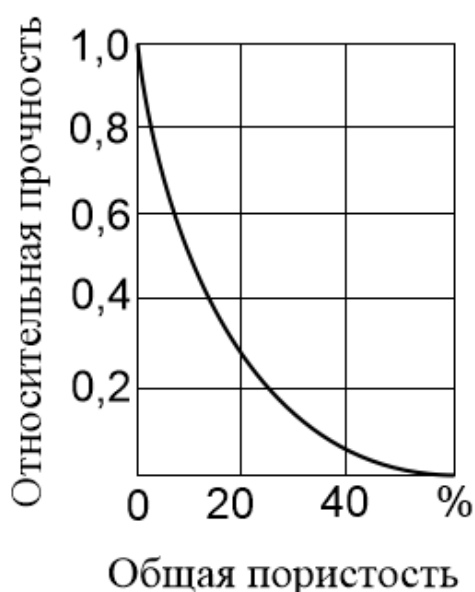


Рисунок 2.8 – Влияние общей пористости на относительную прочность порошковой керамики

Закрытые микро – мезопоры шарообразной формы снижают прочность порошковых материалов в меньшей степени, чем макропоры неправильной формы, соединённые между собой каналами, выполняющими роль внутренних концентраторов напряжений (надрезов).

2. 1. 2. Общая характеристика методов измерения пористости

Известно свыше шестидесяти методов исследования пористой структуры твёрдых тел. Эти методы классифицированы и объединены в восемь групп: непосредственного наблюдения, капиллярные, ртутной порометрии, адсорбционно-структурные, гидростатического взвешивания, калориметрические, объёмно–весовые, эталонные.

Методы непосредственного наблюдения особенно важны из-за получения прямой информации о размерах, форме и расположении пор. В этом отношении они не могут быть заменены никакими другими. Получаемые с их помощью результаты служат необходимым дополнением к другим методам, основанным на модельных представлениях. Они позволяют изучать пористость в широком интервале размеров пор.

Капиллярные методы непосредственно имитируют процессы, происходящие в пористых фильтрах, проницаемых мембранах и других подобных объектах. Метод ртутной порометрии универсален, позволяет получать информацию о структуре в широком интервале размеров пор. Приборы для анализа выпускают серийно, а обработка результатов измерений достаточно проста. Адсорбционно-структурный метод применим главным образом для исследования адсорбентов и катализаторов с сильно развитой пористой структурой.

Методы гидростатического взвешивания выделены в особую группу на основе общего принципа анализа пористости–измерении плотности твёрдых тел. Методы просты и отличаются в тоже время необходимой

точностью. Калориметрические методы погружения в жидкость основаны на тепловом эффекте смачивания поверхности твёрдого тела. Объёмно-весовые методы оценки общей пористости простоты и оперативны, но являются недостаточно точными. Метод эталонной порометрии отличается высокой универсальностью. Его сущность состоит в сравнении исследуемого объекта с эталонным (сравнение со стандартной шкалой).

Комплексное использование этих методов позволяет получить полную информацию о пористой структуре твёрдых тел. Характер пористой структуры может быть качественно изучен при параллельном, независимом применении двух или более способов. Каждый из рассмотренных здесь методов обладает определёнными погрешностями, диапазоном действия и недостатками. Микроскопические (прямые) методы должны дополняться и подтверждаться косвенными, основанными на анализе физико-химических свойств пористого тела.

Выбор метода измерения пористости зависит от необходимой точности испытаний, наличия соответствующей аппаратуры, количества образцов, особенностей строения материала и т.д. На основании данных, полученных этими методами, возможно построение геометрической модели пористой структуры.

Широкое использование в различных отраслях производства пористых материалов, порошковых изделий и газотермических покрытий привело к созданию международных стандартов по испытаниям на пористость. Из большого числа методов исследования пористых структур в лабораторных исследованиях используют около десяти. Ниже кратко рассмотрены некоторые из них, а шесть описаны достаточно подробно.

2.2.3. Метод гидростатического взвешивания

Метод гидростатического взвешивания основан на использовании закона Архимеда: в определении массы тела на воздухе и в жидкости, плотность которой известна.

Метод был первоначально разработан применительно минералов, затем был применён к строительным керамикам, в дальнейшем усовершенствован для измерений в порошковой металлургии и, наконец, стал использоваться для определения плотности и пористости покрытий. Сущность метода состоит в сравнении масс сухого и пропитанного пикнометрической жидкостью образца на воздухе и в пикнометрической жидкости. Объём испытуемого образца (суммарный объём отдельных частей) должен превышать $0,5 \text{ см}^3$.

Метод гидростатического взвешивания по ГОСТ 18898 (этот стандарт является модифицированным относительно международного стандарта ISO 2738) состоит из следующих основных операций: взвешивание на воздухе, закрытие поверхностных пор, взвешивание в воде, пропитка рабочей жидкостью, взвешивание пропитанных образцов на воздухе и в рабочей жидкости. Первые три операции описаны ниже, при оценке кажущейся плотности.

При определении открытой пористости необходимо пропитать образец в рабочей жидкости кипячением или вакуумированием. Для пропитки используют индустриальное масло, ксилол, дистиллированную воду или другие жидкости, имеющие малую упругость паров и стабильную плотность. Дистиллированную воду предварительно дегазируют кипячением в течение 1,5–2ч.

Метод пропитки кипячением наиболее прост. Образцы погружают в кипящую жидкость и выдерживают в ней не менее двух часов. Как правило, такой пропитки бывает недостаточно. Для повышения точности испытаний рекомендуется более полное заполнение всех пор смачивающей жидкостью. Для этого пропитывают образец в вакууме или в условиях принудительной фильтрации жидкости через поры с последующей выдержкой образцов в жидкости в течение нескольких часов. При вакуумировании (рис. 2.9) стакан

с образцами помещают в вакуумный колпак, соединенный с форвакуумным насосом. В бюретку заливают рабочую жидкость.

Заполнять жидкостью поры в вакуумной установке следует после 30-минутной выдержки образцов в вакууме 10^{-2} - 10^{-1} Па. Насыщающую жидкость подают в колпак постепенно, до полного покрытия ею образцов. Время пропитки предварительно вакуумированных образцов - не менее 20 мин. Если образцы предварительно не вакуумированы и время пропитки невелико, то вычисляется кажущаяся (условная) пористость, не имеющая физического смысла и являющаяся функцией времени пропитки, формы пор и т.д.

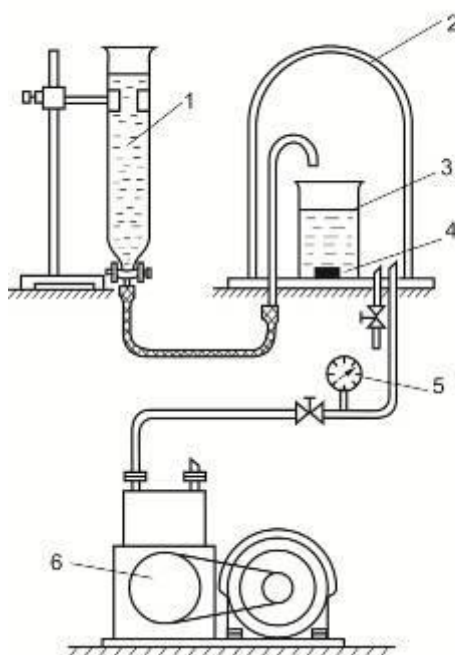


Рисунок 2.9 – Вакуумная установка для пропитки: 1 - бюретка; 2 - вакуумный колпак; 3 - химический стакан; 4 – образец; 5 - манометр; 6 - вакуумный насос

Пористость общую (Побщ), открытую (Поткр) и закрытую (Пзакр) определяют в процентах по формулам:

$$\Pi_{\text{общ}} = \left(1 - \frac{\rho_{\kappa}}{\rho_{\text{ист}}} \right) \cdot 100 \quad (2.7)$$

$$\Pi_{\text{откр}} = \frac{(m_2 - m_1)\rho_{\text{в}}}{(m_2 - m_3)\rho_{\text{ж}}} \cdot 100 \quad (2.8)$$

$$\Pi_{\text{закр}} = \Pi_{\text{общ}} - \Pi_{\text{откр}} \quad (2.9)$$

где ρ_{κ} —кажущаяся плотность, г/см³;

$\rho_{\text{ж}}$ — плотность пропитывающей жидкости, г/см³;

$\rho_{\text{в}}$ —плотность воды, г/см³;

$\rho_{\text{ист}}$ —истинная плотность, г/см³;

m_1 — масса образца, взвешенного на воздухе, г;

m_2 - масса пропитываемого образца, взвешенного на воздухе, г;

m_3 — масса пропитанного образца, взвешенного в воде, г.

Стандарт ГОСТ 9.302 рекомендует использовать следующие значения

$\rho_{\text{ист}}$ металлов (табл 2.1):

Табл.2.1. Плотность некоторых металлов

Металл	Плотность, г/см ³
Железо	7,87
Кадмий	8,65
Медь	8,9
Никель	8,9
Олово	7,3
Свинец	11,34
Хром	7,1
Цинк	7,2
Алюминий	2,7

Международный стандарт ISO 2738 регламентирует три варианта подвешивания образца при взвешивании на воздухе и в воде. Плотность воды при комнатной температуре принимают $\rho_w = 0,997 \text{ г/см}^3$. Для повышения точности результатов рекомендуется делать поправку на объём погружённой в воду проволоочки, на которой подвешивают образец. Эту поправку находят взвешиванием проволоочки на воздухе и затем в воде после погружения на нужную глубину. Один из трёх вариантов взвешивания на воздухе и в воде, рекомендуемых ISO 2738, представлен на рис. 2.10.

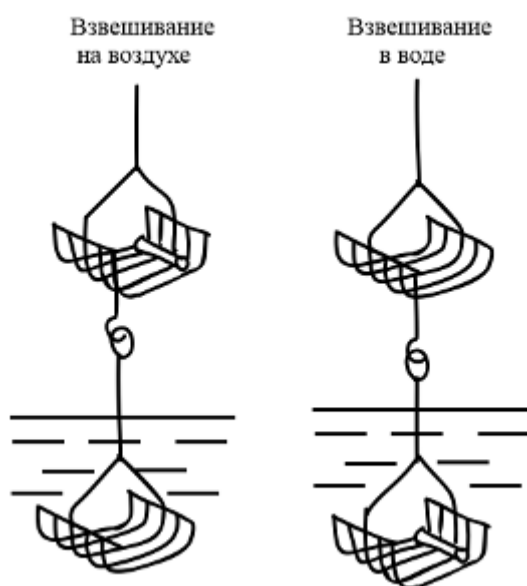


Рисунок 2.10 – Устройство (контейнер) для взвешивания образца на воздухе и в воде.

На точность стандартных измерений пористости влияют размеры, геометрия, особенности пористой структуры и методика измерений. Увеличение размеров образца, большее отношение поверхности образца к его объёму уменьшают погрешность. Точность измерений возрастает при использовании приведённого выше модифицированного варианта гидростатического взвешивания, который снижает ошибку с 25-50 до 5-20 %.

2.2.4. Микроскопические количественные методы

Микроскопические методы дают наглядную, прямую информацию о размерно-геометрических характеристиках пор. Иногда воспроизводят

(реконструируют) объёмную пористую структуру микроскопическим анализом последовательных сечений (шлифов) сделанных с небольшим одинаковым шагом. Этот метод получил название непосредственной реконструкции и применяется для количественного описания непрерывности элементов пористой структуры. Микроскопические методы позволяют также реконструировать объёмную форму пор совмещением и анализом полученных снимков сечений, сделанных с определённым шагом. Применяют три микроскопических метода: секущих (Розиваля), точечный (Глаголева) и сравнением со стандартной шкалой.

Объектом исследования во всех случаях служат нетравленные шлифы, которые рассматривают при одном и том же увеличении микроскопа. Площадь шлифа (шлифов) должна быть не менее $0,5\text{см}^2$.

Исследуемые шлифы должны быть очень тщательно приготовлены с обеспечением постоянства фокусировки микроскопа, исследуемая поверхность не должна иметь дефектов, возникших при шлифовании. Необходимо тщательно выполнять условия подготовки шлифа, так как при превышении оптимального давления на образец возможен вырыв из образца отдельных зерен (частиц), а места вырыва фиксируются как поры **рис. 2.11**.

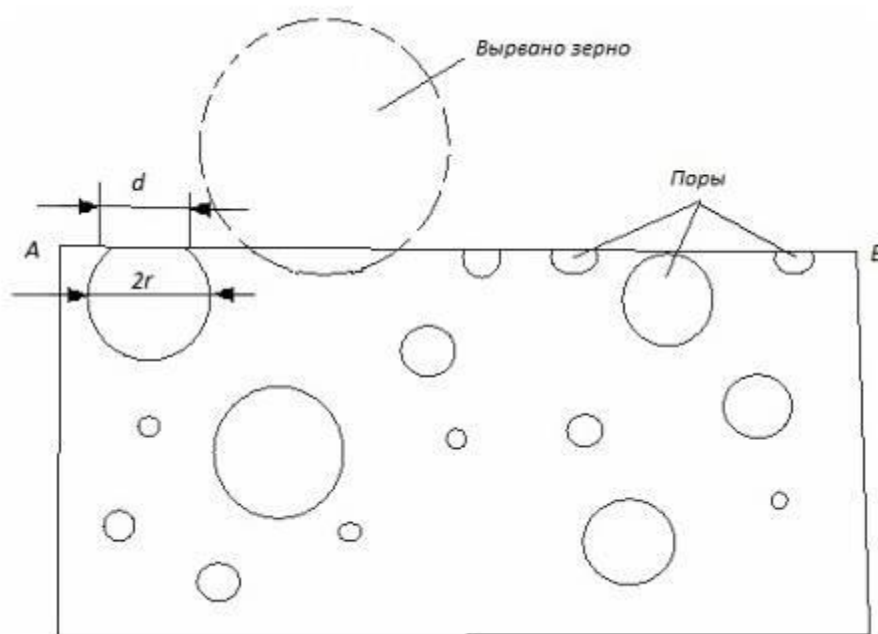


Рисунок 2.11 – Схема строения пористой структуры материала, фиксируемая на шлифе. АВ - плоскость шлифа, d - «диаметр» поры на шлифе, $2r$ - диаметр поры фактический (по С. А. Салтыкову).

Контроль качества шлифа можно провести сравнением полученных этим методом результатов общей пористости со значениями, определёнными методом гидростатического взвешивания. Если шлиф выполнен качественно, то результаты, полученные независимыми способами, близки. При микроскопическом анализе необходимо выбирать характерный участок, полностью представляющий поверхность всего шлифа. Макро- и мезопоры изучают на оптическом микроскопе, микропоры исследуют на электронном микроскопе.

Микроскопические методы А. Розиваля и А. Глаголева использует основные положения стереометрической металлографии. Используя математические зависимости, выведенные в стереометрической металлографии, вычисляют одно-, двух- и трёхмерные (линейные, плоскостные и объёмные) параметры пористой структуры. Так, для количественной оценки пористости строительных материалов возможно использование четырнадцати различных параметров.

В основе микроскопического метода А. Розиваля лежит первое стереометрическое соотношение, по которому доля фазы (пор) в объеме материала равна части секущей линии, проходящей через эту фазу (поры) на площади шлифа. Необходимо суммировать длины отрезков, попадающих на поры, а затем, для определения общей пористости, результат отнести к общей длине секущих линий. Точность испытаний по методу А. Розиваля зависит от суммарной длины секущих. Наиболее важные из стандартных характеристик пористой структуры, приведены в **таблице 2.2.**

Формулы, приведённые в таблице, выведены для пор, имеющих сферическую форму. Вместе с тем показано, что в большинстве случаев

погрешности, вызванные отличием формы пор от сферической, не превосходят суммарной ошибки, вызванной другими причинами.

Табл. 2.2 - Характеристики пористой структуры по ГОСТ 22023

Термин	Определение	Формула	Размерность
Общая пористость	Отношение суммарной длины отрезков, попадающих на поры, к общей длине секущей линии	$P_{\text{общ}} = \frac{\sum l}{L_1} \cdot 100$	-
Условный среднеарифметический диаметр пор	Отношение суммы отрезков, образующихся от пересечений секущих с периметром сечения пор, к числу замеров	$\bar{l} = \frac{K \sum l}{m_1}$	мм
Средний радиус сечения пор на площади шлифа	Отношение суммарной площади пор на шлифе к количеству пор	$\hat{\rho} = \left(\frac{P_{\text{общ}}}{\pi n_1} \right)^{1/2}$	мм
Среднеарифметический радиус сечений пор на плоскости шлифа	Отношение суммарной длины радиусов всех пор на шлифе к количеству пор	$\bar{\rho} = \frac{m_1}{2n_1 L_1 K}$	мм
Средний радиус пор по объему	Отношение суммарного объема пор к их числу	$\hat{r} = \left(\frac{P_{\text{общ}}}{4/3\pi N_1} \right)^{1/3}$	мм
Среднеарифметический радиус пор	Отношение суммарной длины радиусов пор к их числу	$\bar{r} = \frac{n_1}{2N_1}$	мм
Количество пор на плоскости шлифа		$n_1 = \frac{0.785 \sum l^{-1}}{L_1 K^2}$	шт/мм ²
Количество пор в единице объема		$N_1 = \frac{0.5 \sum l^{-2}}{L_1 K^3}$	шт/мм ³
Поверхность пор в единице объема		$S_1 = 4 \frac{m_1}{L_1}$	мм/мм ³

В качестве секущей удобно использовать окулярную линейку, вставляемую в объектив, которая разделена рисками на сто условных единиц.

Секущие также можно наносить на микрофотографию структур или на изображения, полученные на экране микроскопа. Определяют $\sum l, \sum \frac{1}{l}, \sum \frac{1}{l^2}$,

где l – линейные размеры сечений пор на секущей.

Согласно А. Розиваля, секущие могут иметь произвольную форму, главное, чтобы они равномерно располагались на анализируемой поверхности шлифа. Вычисляют характеристики пористой структуры после не менее трёхсот измерений длины секущих.

Точечный метод А. Глаголева применяют в металлографии для определения фазового состава сплава. Согласно теории вероятности число точек, беспорядочно и равномерно расположенных на плоскости и попавших на вторую фазу (поры) будет пропорциональна площади и объёму этой фазы. Погрешность метода зависит от общего количества подсчитанных точек. Для ускорения подсчёта рекомендуется пользоваться методом полей, при котором в одном поле зрения рассматривают узловые точки квадратной сетки окуляра (рис. 2.12). Перемещая шлиф, при каждом новом его положении подсчитывают количество узловых точек окуляра, попавших на анализируемую структурную составляющую (пору).

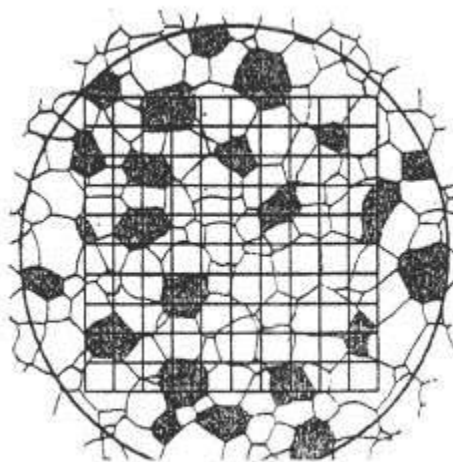


Рис. 2.12 - Определение общей пористости методом А. Глаголева.

Для малопористых материалов можно рекомендовать эталонные шкалы пористости по ГОСТ 9391. Общую пористость для пор размером от 10 до 100 мкм определяют на нетравленном шлифе сравнением со стандартной шкалой при увеличении 100 или 200 крат. При этом общая пористость не должна превышать 0,8 %.

Международный стандарт ISO 4505 предлагает пористость указывать, ссылаясь на соответствующую эталонную микрофотографию, обозначая её буквами А или В с цифрами 02, 04, 06, 08 (рис. 2.13).

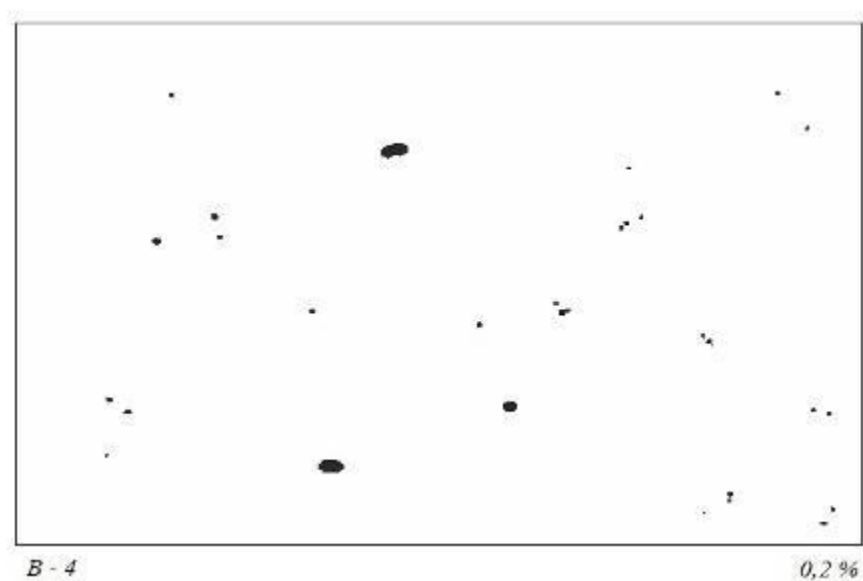


Рисунок 2.13 – Тип ‘В’ пористости при увеличении 100 крат по ISO 4505.

Микроскопическим методам определения пористости присущи, по крайней мере, три недостатка. Во-первых, они дают информацию о структуре только в одном случайном сечении и не позволяют оценить пористость в объеме. Во-вторых, занижаются значения пористости, так как большая часть пор, размер которых менее 1 мкм, при оптическом анализе не фиксируется. В-третьих, точность оценки пористости данными методами в несколько раз ниже, а трудоёмкость выше, чем в методе гидростатического взвешивания.

Другой проблемой при проведении стереометрического исследования является трудность получения плоского неискажённого шлифа. При

обработке хрупких материалов наблюдается выкрашивание частиц, что приводит к резкому 'увеличению' доли пор размером 1–10 мкм. С другой стороны, возможно замазывание и маскировка микро – и мезопор шлифовальными пастами и продуктами шлифовки.

Результаты оптических и электронно-микроскопических исследований пористости не всегда совпадают. Так, при изучении материалов из оксида циркония и оксида иттрия на световом микроскопе видна достаточно развитая пористая структура. Однако, на снимке, полученном на растровом электронном микроскопе, количество пор значительно меньше. Это различие обусловлено частичной оптической прозрачностью керамики.

Как уже указывалось выше, металлографический микроскоп может разрешать объекты более 0,2 мкм, поэтому на приборе невозможно рассмотреть микропоры. С другой стороны, на растровом электронном микроскопе возможно их исследование, но для получения изображений мезо - и макропор следует уменьшать увеличение, что затрудняет изучение пористых структур с широким диапазоном распределения пор по размерам.

Микроскопические методы при большом количестве исследуемого материала достаточно трудоёмки. С целью ускорения исследований и получения более объективных результатов применяют специальные приборы - автоматические количественные анализаторы структуры. Приборы позволяют одновременно оценить общую пористость, фазовый количественный состав материала, измерить размер частиц (зёрен) и др. Геометрические и оптические характеристики структуры поступают в многофункциональные системы автоматического количественного анализа изображений и обрабатываются на компьютере по специальным программам.

2.2.5.Ртутная порометрия

Порометрия - совокупность методов по оценке распределения пор по размерам. Основным способом её является ртутная порометрия. В основе метода ртутной порометрии лежит вдавливание ртути в открытые поры и

вычисление по уравнению капиллярности распределение открытых пор по размерам. Что касается открытой пористости, то ртутная порометрия является основным и самым достоверным способом измерения.

Метод ртутной порометрии в приложении к оксидным покрытиям всесторонне рассмотрен в работе С. С. Бартенева с сотр. При оценке применимости метода ртутной порометрии для исследования пористой структуры принципиально важным является вопрос об ее устойчивости к воздействию высоких давлений. При этом наиболее подвержены деформации и разрушению пластичные металлы, в которых имеются закрытые или малодоступные для ртути мезо- и микропоры.

Для повышения точности метода необходимо использовать одинаковые образцы со шлифованной поверхностью, так как выбоины и риски, находящиеся на поверхности образца, зафиксируются как крупные поры.

Для исследования пористости в порошковой металлургии используют ртутные поромеры. Принцип действия приборов основан на определении объёма ртути, проникшей в поры при ступенчато увеличивающемся давлении, отнесенного к объёму исследуемого материала. Необходимо воздействовать на поверхность ртути, поскольку она не смачивает большинство материалов и в противном случае не заполнит поры. Для заполнения длинных и узких поровых каналов необходимо большее давление, чем для глобулярных открытых пор.

При ступенчатом повышении давления каждый раз определяют объём ртути, вошедшей в образец, и относят его к объёму образца, что позволяет строить интегральную и дифференциальную порограммы. В первом более распространённом случае при измерении объёма пор обычно используют единицу измерения $\text{см}^3/\text{г}$.

Радиусы пор r_K , мм, вычисляют по формуле

$$r_K = \frac{2\sigma \cos\theta}{P_N}, \quad N = 1, 2, \dots \quad (2.10)$$

где θ – угол смачивания;

σ – поверхностное натяжение ртути, Н / мм;

P_N – давление, Н/мм².

Ртутная порометрия является одним из простых и информативных методов изучения пористой структуры в интервале размеров пор от 3,5 нм до сотен микрон. Это достигается во многом благодаря выпуску большого количества автоматизированных и полуавтоматизированных приборов фирмы «Микромеритикс» (США), которая выпускает наиболее совершенный прибор «Автопор 9200».

Автопор имеет независимые друг от друга четыре ячейки низкого и две высокого давления. Максимальное давление в ячейке низкого давления 0,19МПа, что позволяет исследовать поры в интервале 0,003–360 мкм. Прибор снабжен терминалом, с которого производится управление сбором и обработкой данных. Результаты исследования выводятся на печать в виде таблиц и графиков. Последние модификации прибора снабжены персональным компьютером.

Основное преимущество ртутной порометрии перед методом гидростатического взвешивания-- более высокая точность измерений.

2.2.6.Метод вытеснения

Метод основан на измерении давления, необходимого для вязкого прохождения воздуха через образец, поры которого заполнены смачивающей жидкостью с известным поверхностным натяжением. Вязкое течение возможно только в сквозных макро - и мезопорах диаметром более 1 мкм, а в более тонких поровых каналах будут превалировать пристеночное или кнудсеновское течения. Из-за этого метод вытеснения для оценки распределения сквозных пор по размерам возможен лишь для областей макро- и мезо-.

Для порошковых материалов этот метод стандартизирован ГОСТ 26849, ISO 4003. Дисковые образцы должны иметь следующие размеры:

диаметр-25-100 мм, толщина - не менее 250 мкм. Для насыщения используют этиловый спирт плотностью 0,807 г/см³. Стандарты допускают использование другой жидкости, обеспечивающей полное смачивание поверхности материала при отсутствии химического взаимодействия с ним. Скорость прироста давления (от 20 до 100 Па/с.) подбирают опытным путём.

При применении этого метода для материалов, поры которых имеют сужения и расширения, фиксируются самые узкие участки этих пор. Перед испытанием образец пропитывают жидкостью. Наиболее эффективна пропитка образца, подвергнутого предварительному вакуумированию. Схема установки для определения размеров пор вытеснением из них жидкости показана на рис.2.14

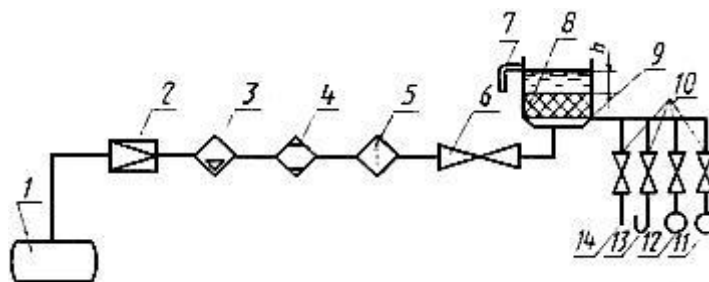


Рисунок 2.14 – Схема стандартной (по ГОСТ 26849) установки для определения размеров пор, вытеснением из них жидкости: 1 - источник сжатого воздуха; 2 - редукционный клапан; 3 - влагомаслоотделитель; 4 - осушитель; 5 - фильтр; 6 - кран точной регулировки; 7 - сливная трубка для установки уровня жидкости над образцом; 8 - испытываемый образец; 9 - держатель для крепления образцов; 10 – кран; 11 - манометр; 12 - манометр; 13 - U-образный манометр, заполненный водой; 14 - манометр

Пропитанный жидкостью образец помещают в специальный патрон. В полость под образцом подают воздух и плавно повышают его давление. Наблюдая за поверхностью образца, фиксируют давление воздуха, при

котором на поверхности образца открывается не менее трёх пор (в слое жидкости образуется соответствующее количество цепочек пузырьков газа). Это давление соответствует раскрытию макропор. Дальнейшее увеличение давления под образцом приводит к интенсивному выходу пузырьков газа по всей поверхности образца, что соответствует раскрытию мезопор (рис.2.15).

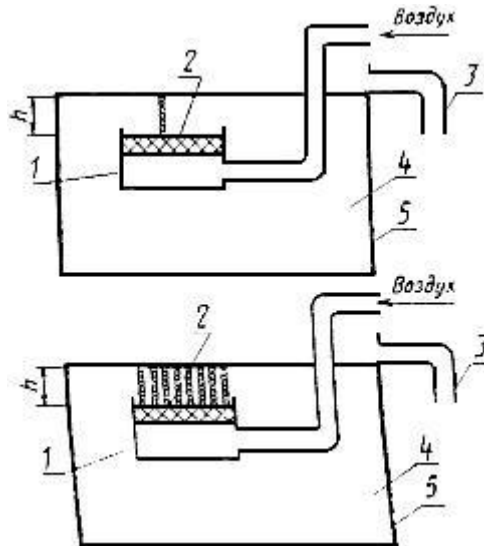


Рисунок 2.15 – Схема испытаний по ГОСТ 26849: а - раскрытие макропор; б - раскрытие мезопор: 1 - держатель образца; 2 - испытуемый образец; 3 - трубки для слива жидкости; 4 - жидкость; 5 - сосуд для жидкости; h - высота столба жидкости над испытуемым образцом

Размеры макро - мезопор (d , мкм) вычисляют по формуле

$$d = \frac{4 \cdot 10^3 \delta_t}{p - \rho_t g h} \quad (2.11)$$

где: δ_t —поверхностное натяжение жидкости, Н/м;

P —давление, при котором выделяются пузырьки воздуха в случае определения размера макропор($d_{\max}$) или пузырьки воздуха со всей поверхности образца при определении размера мезопор ($d_{\text{ср}}$), Па;

ρ_t —плотность жидкости, г/см³;

g —ускорение свободного падения, м/с²;

h —высота столба жидкости, м.

На точность результатов существенное влияние оказывает скорость повышения давления воздуха под образцом. Так, ускоренное повышение давления приводит к тому, что поры освобождаются от жидкости несколько позже момента установления равновесного давления, соответствующего истинному размеру пор образца. Поэтому при проведении исследований необходимо повышать давление медленно, особенно когда можно ожидать открытие макропор.

Метод вытеснения жидкости применяют для определения размеров пор от 1 до 250 мкм. Недостатками метода являются большие погрешности и сложность приготовления образцов.

2.2.7. Определение пористости по методу восстановленного отпечатка

С. И. Булычев и В. П. Алёхин разработали интересный способ измерения пористости по параметрам вдавливания индентора. Авторы рассмотрели теоретические аспекты этого вопроса и показали, что испытания материалов с постоянной регистрацией диаграммы вдавливания вступили в новый качественный этап своего развития. Разработан автоматизированный комплекс для измерения микротвердости материалов и покрытий, который предназначен для исследования микромеханических свойств с постоянной регистрацией диаграммы вдавливания в координатах: усилие - глубина отпечатка. Полученная на приборе диаграмма вдавливания (рис. 2.16) позволяет в частности оценить особенности микродеформации в широком диапазоне прикладываемых усилий и глубин отпечатка.

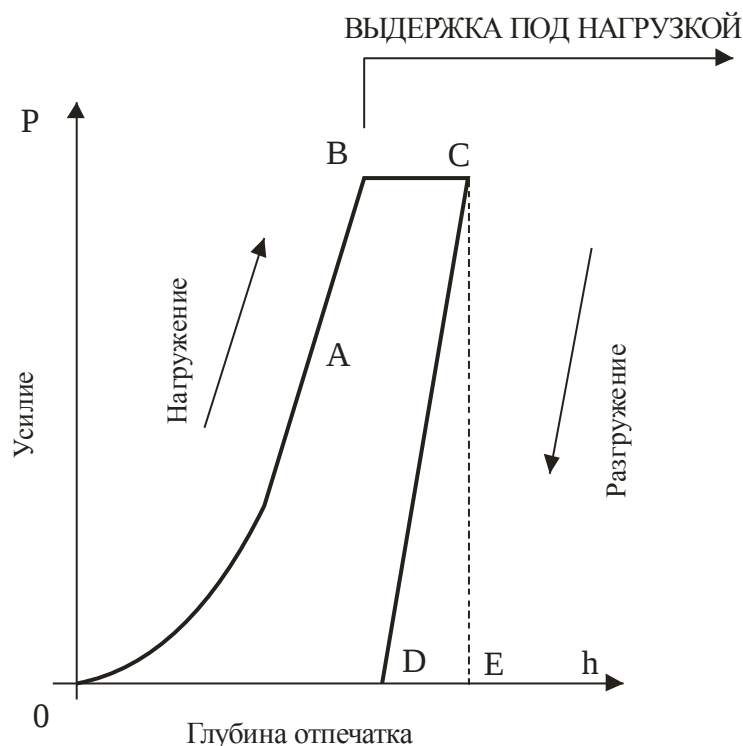


Рисунок 2.16 - Типичная диаграмма вдавливания индентора: P - усилие; h - глубина отпечатка

Участок нагружения OAB на диаграмме вдавливания представляет функциональную зависимость глубины отпечатка h от прикладываемого усилия P . Участок диаграммы BC описывает реологические свойства испытываемого материала, в частности, характеризует явление микроползучести. Участок диаграммы CD дает информацию, связанную с упругими свойствами материала, он вызван релаксацией энергии, накопленной в процессе упругопластической деформации при внедрении индентора.

Анализ площадей диаграммы вдавливания, пропорциональных работам, производимым на стадиях нагружения и разгрузки, позволяет оценить деформационную $a_{\text{деф}}$ и релаксационную $a_{\text{рел}}$ способности испытываемого материала. Полная работа A складывается из работы остаточного формоизменения $A_{\text{оф}}$ (площадь OBCE) и работы сил последствия $A_{\text{рел}}$ (площадь CED).

При испытаниях могут быть определены как общая пористость, так и характер распределения пор по размерам. Возможность определения общей пористости основана на способности пористого материала к уплотнению, имеющему место в условиях высоких сжимающих напряжений под отпечатком. Это сопровождается изменением высоты валика и модуля Юнга. Используя эти показатели, авторы получили эмпирические зависимости для определения пористости.

На характер диаграммы вдавливания индентора влияет не только общая пористость, но и характер распределения пор по размерам. Причём пора рассматривается как частный случай структурной неоднородности двухфазного материала с нулевой твёрдостью фазы включения. Предложенная методика имеет преимущества перед известными способами не только в том, что характеристики пористости определяются одновременно с механическими свойствами. Весь комплекс свойств материала может быть определён в различных частях образца или изделия.

С середины 80-х годов способ непрерывной регистрации параметров вдавливания индентора совершенствовался в направлении значительного уменьшения нагрузки на индентор. Стало возможным применять новые автоматизированные приборы с локальным нагружением в наноньютоновой области с измерением перемещения индентора до сотых долей нанометра.

2.2.8.Коррозионные методы

Методы оценки пористости, применяемые преимущественно для гальванических и лакокрасочных покрытий, являются разновидностью ускоренных испытаний на коррозию. Сущность этих методов состоит в воздействии специально подобранной коррозионной среды (электролит или индикаторный раствор) через сквозные поры на металлическую основу. Последующее обнаружение и количественный подсчёт продуктов коррозии на поверхности покрытия позволяют количественно характеризовать пористость

Разработан отечественный стандарт (ГОСТ 9.302) по прямым методам испытаний электролитических покрытий на пористость. Обзор коррозионных методов испытаний различных покрытий на пористость сделан также в международном стандарте ISO 10308. По ГОСТ 9.302 для определения пористости покрытий используют методы погружения, наложения фильтровальной бумаги и паст.

Детали, смоченные раствором, выдерживают в течение 5 минут при 18–20⁰С, после чего на контролируемой поверхности подсчитывают число пятен, соответствующих числу пор в покрытии.

Среднее число пор на единице поверхности определяют по формуле:

$$N_{cp} = N_{общ} / F, (2.12)$$

где $N_{общ}$ – общее число пор на испытываемой поверхности;

F – площадь этой поверхности, см².

Метод наложения фильтровальной бумаги применяется для контроля пористости хромовых, никелевых и оловянных покрытий на стали. На подготовленную деталь накладывают фильтровальную бумагу, пропитанную соответствующим раствором так, чтобы между поверхностью детали и бумагой не оставалось пузырьков воздуха. После выдержки в течение определённого времени бумагу с отпечатками пор в виде пятен снимают, промывают дистиллированной водой, просушивают на чистом стекле.

Метод паст основан на химическом взаимодействии металла основы с реагентом, входящим в состав паст. При этом в местах пор образуются окрашенные соединения, наблюдаемые визуально. Метод применим для определения пористости покрытий на стали, меди, алюминии, цинке и их сплавах, на деталях любой конфигурации и размеров.

Коррозионные методы не позволяют учесть размер и форму пор. Кроме того, продукты коррозии, находясь на поверхности покрытия, могут перекрывать микро- и мезопоры или покрывать участки без пор, что приводит к искажению результатов испытаний.

2.3 Коэффициент проницаемости

2.3.1. Понятия и определения

Проницаемость – способность твёрдых тел пропускать сквозь себя жидкости или газы. Она является важной характеристикой как пористых, так и беспористых материалов различного назначения и характеризуется коэффициентом проницаемости, который для пористых материалов изменяется в широких пределах. Иногда вместо коэффициента газопроницаемости используют *коэффициент фильтрации*, не зависящий от динамической вязкости газа.

Проницаемые материалы используют для изготовления фильтров, пористых электродов, катализаторов в каталитических камерах и т. д.

Наблюдается чёткая корреляция между значениями открытой пористости и коэффициентом проницаемости. Это обстоятельство может быть использовано, в частности, для поиска микротрещин в керамиках. Коэффициент фильтрации и открытая пористость обычно связаны логарифмической зависимостью.

Коэффициент газопроницаемости – величина, характеризующая зависимость объёма данного газа, проходящего через образец в единицу времени, от перепада давления в нём. На величину коэффициента газопроницаемости влияют многие факторы: направление прохождения газа, пористость, распределение пор по размерам, наличие трещин, температура и состав газовой среды (динамическая вязкость газа). Проницаемость сквозных пор зависит от протяженности, формы и шероховатости сообщающихся поровых каналов.

Проницаемость в значительной степени определяется финишной технологией порошкового изделия. Использование различных уплотнителей уменьшает коэффициент фильтрации в 20-60 раз. Коэффициент газопроницаемости порошкового материала зависит от режима течения газа:

ламинарного, переходного от ламинарного к турбулентному или турбулентного. Испытания следует проводить при ламинарном режиме течения газа.

2.3.2. Образцы, оборудование, испытания

Для испытаний применяют специально изготовленные образцы-диски. Количество образцов должно быть не менее трёх на один технологический режим. Диаметр рабочей поверхности образца для испытаний должен быть больше стократного, а толщина образца больше десятикратного среднего диаметра частиц порошка, из которого изготовлен образец.

Установка для определения коэффициента газопроницаемости состоит из трёх основных частей: держателя образца 2, манометра 8 и сосуда 5 емкостью не менее 30 л (рис.2.17). Сосуд имеет в нижней части трубку с краном 6, к горловине сосуда пришлифована резиновая пробка со стеклянной трубкой и кранами 3 и 4. Для крепления образца 1 в установке предусмотрено специальное устройство – держатель 2.

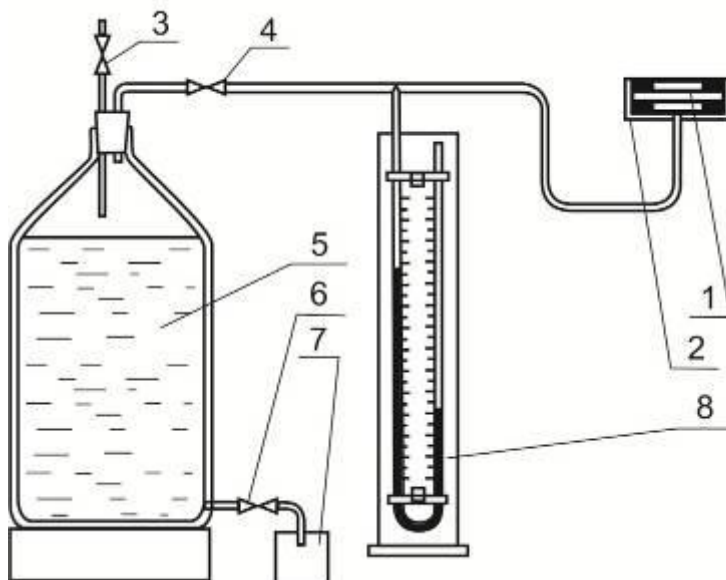


Рисунок 2.17 – Установка для определения коэффициента газопроницаемости: 1 – образец; 2 – держатель; 3, 4, 6 – краны; 5 – сосуд; 7 – мерный сосуд; 8 – манометр.

Образец закрепляют в держателе с помощью двух эластичных резиновых прокладок, обеспечивающих надёжный контакт. Для герметичности прибора краны 3, 4, 6 смазывают тонким слоем вакуумной смазки и притирают.

Перед испытаниями при открытом кране 4 через трубку в сосуд заливают воду, уровень которой определяет перепад давления на образце. Далее установку проверяют на герметичность. Для этого в держатель вместо образца вкладывают беспористый металлический диск. Если в течение 5 – 7 минут не наблюдалось вытекания воды и понижения давления, то установка считается достаточно герметичной.

Толщину образца замеряют в трёх точках микрометром с точностью до 0,01 мм. Для предотвращения подсоса воздуха на торцевую поверхность резиновых прокладок наносят тонкий слой вакуумной смазки. Перед испытаниями поверхность образцов должна быть тщательно очищена, обезжирена и высушена. До испытаний образцы следует хранить в эксикаторах.

После установки образца в держатель, предварительно проверенного на герметичность прибора, создают перепад давления последовательно 50, 100, 150 и 200 мм вод. ст. При этом фиксируют расход воздуха. Если отношение показателя расхода воздуха к перепаду давления для всех замеров не превышает 5% от средней величины, то можно считать, что обеспечен режим ламинарного течения.

Коэффициент газопроницаемости характеризуется углом наклона прямой на графике в координатах «расход воздуха – перепад давления на образце». Такая линейная зависимость типична только для режима ламинарного течения. При наложении турбулентного режима линейная зависимость нарушается, и коэффициент газопроницаемости становится величиной переменной.

При проведении испытаний открывают кран 3, и, получив необходимый стабильный перепад давления, замеряют мерным цилиндром 7, объём воды, вытекаемой из ёмкости 5. Время истечения воды выбирают в интервале от нескольких минут до нескольких часов в зависимости от пористой структуры исследуемого материала. Количество вытекшей воды замеряют с погрешностью до 1,0 мл.

Расход воздуха в режиме ламинарного течения вычисляют как отношение объёма воздуха, прошедшего через образец (объёма воды, вытекшей из ёмкости), к времени истечения.

Коэффициент газопроницаемости (K) в мм^2 вычисляют по формуле:

$$K = \frac{Q \cdot \mu \cdot \delta}{S \cdot \Delta P} \quad (2.13)$$

где Q – расход воздуха в режиме ламинарного течения, $\text{мм}^3/\text{с}$;

μ – динамическая вязкость воздуха, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

δ – толщина образца, мм ;

S – активная поверхность сечения образца, мм^2 ;

ΔP – перепад давления воздуха на образце в режиме ламинарного течения, Па .

При допущении, что структура и размеры пор не меняются при изменении температуры, коэффициент газопроницаемости воздуха при высоких температурах (K_t) вычисляют по формуле:

$$K_t = K_{20} \frac{\mu_{20}}{\mu_t} \quad (2.14)$$

где K_{20} – коэффициент газопроницаемости при 20°C ;

$\frac{\mu_{20}}{\mu_t}$ – температурный фактор (отношение значений динамических вязкостей воздуха при температурах 20°C и t).

Коэффициент газопроницаемости материала для любого газа ($K_{\text{газ}}$) рассчитывают по формуле, учитывающей соотношение динамических вязкостей газа ($\mu_{\text{газ}}$) и воздуха ($\mu_{\text{возд}}$).

$$K_{\text{газ}} = K_{\text{возд}} \frac{\mu_{\text{возд}}}{\mu_{\text{газ}}} \quad (2.15)$$

Коэффициент фильтрации определяется в основном количеством и площадью сужений поровых каналов. С.С. Бартенев с сотр. рассмотрели влияние формы поровых каналов, открытой пористости, давления газа и других параметров на коэффициент фильтрации. Они же предложили уточнённые методики оценки коэффициентов газопроницаемости и фильтрации с учётом возможных основных погрешностей.

При изучении керамических материалов используют ГОСТ 11573, который устанавливает метод определения коэффициента газопроницаемости огнеупорных изделий с открытой пористостью более 5 %. Измерения проводят, пропуская через образец воздух или другие газы. По полученным данным (расходу газа, давлению, температуре и размерам образца) вычисляют коэффициент газопроницаемости. Недостатки метода: трудность измерения малых расходов газа, необходимость применения ‘толстых’ образцов. Схема стандартной установки для определения коэффициента газопроницаемости приведена на рисунке 2.18.

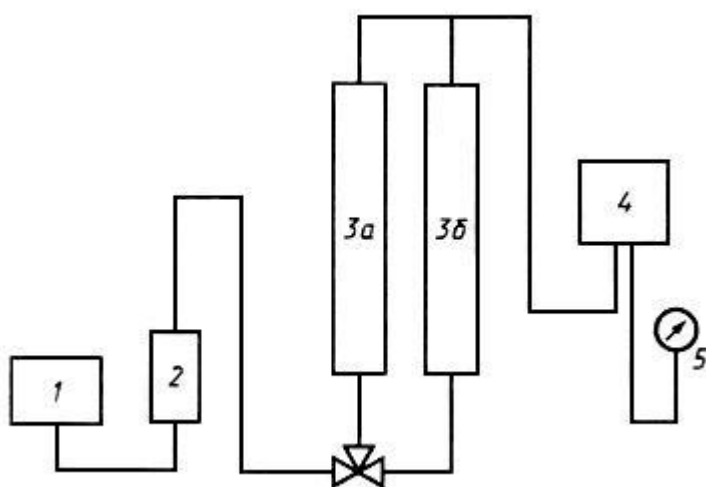


Рисунок 2.18 – Схема установки для определения газопроницаемости по ГОСТ 11573: 1 - источник сжатого газа (воздуха) с системой, обеспечивающей стационарный поток газа через манометр, 2 - сосуд — осушитель сжатого воздуха, 3а, 3б — расходомеры, 4 — держатель образцов, 5— жидкостный манометр

2.4 Электрическая прочность

2.4.1. Понятия и определения

Для электроизоляторов (диэлектриков) основным физическим свойством следует считать электрическую прочность. *Электрическая прочность* ($E_{пр}$) - способность материала сохранять высокое электрическое сопротивление при больших напряженностях электрического поля. Её характеризует напряженность поля, при которой происходит резкое возрастание проводимости образца, т.е. пробой.

Различают два вида *пробоя*: *тепловой* (вследствие локального разогрева электрическим током) и *электрический* (при критической концентрации токоносителей). При пробое под действием сильного электрического поля в диэлектрике рвутся прочные химические связи, что сопровождается появлением свободных носителей электрического заряда (плазмы) и нарушается электрическая прочность.

Тепловой пробой вызывается диэлектрическими и ионизационными потерями, при которых тепло генерируется быстрее, чем рассеивается. В этом случае пробой есть следствие тепловой неустойчивости материала. При *электрическом пробое* разряды инициируются местными полями высокого напряжения, преимущественно во внутренних пустотах (порах) материала. Разряды вызывают локальные разрушения перемычек между порах (частичный разряд). Такие процессы продолжаются до образования магистрального канала пробоя между электродами. Время воздействия

электрического пробоя твёрдого диэлектрика составляет доли секунды, теплового пробоя – от секунд до нескольких часов.

Электрическую прочность оценивают отношением пробивного напряжения однородного электрического поля к толщине образца. *Пробивное напряжение* – минимальное напряжение, приводящие к пробоею покрытия. При поверхностном пробое разряд не распространяется вглубь диэлектрика, а ограничивается только поверхностными слоями. Образование разряда вне образца называют перекрытием. Электрическая прочность компактного материала всегда выше прочности аналогичных реальных пористых тел, так как последние обладают большей дефектностью структуры и обычно повышенным содержанием примесей.

Электрическая прочность зависит от однородности диэлектрика, природы и состояния окружающей среды, формы и размеров испытательных электродов. На E_{np} влияют также электрические параметры испытаний: вид тока (переменный, постоянный), частота тока (промышленная, повышенная), характер подъема напряжения (ступенчатый, плавный), скорость изменения тока. Обычно электрическая прочность уменьшается с увеличением температуры. Разброс значений электрической прочности при комнатной температуре достигает 30 %, при увеличении температуры испытаний разброс данных уменьшается.

Относительная влажность влияет на электрическую прочность в той мере, в какой влага, поглощенная испытуемым материалом или влага на поверхности, влияют на диэлектрические потери и поверхностную проводимость.

Электрическую прочность определяют для сравнения электроизоляционных материалов, технологий изготовления диэлектриков, косвенной оценки пористости материалов. Испытания следует рассматривать как предварительные, поскольку имеют место значительное многообразие и взаимодействие факторов, определяющих величину пробивного напряжения.

Электрическую прочность окончательно оценивают после натурных испытаний или на основе опыта эксплуатации.

Приблизительные значения электрической прочности некоторых изоляторов следующие (кВ/мм): электротехническая керамика (фарфор)-25-30, электроизоляционное стекло-70, полиэтилен-30, поливинилхлорид-40. При тепловом пробое и частичном разряде, характерном для пористых материалов, электрическая прочность меньше, чем у монолитных аналогов.

Хорошими диэлектрическими характеристиками обладают оксиды алюминия, магния, бериллия, нитриды алюминия, бора, кремния. У электроизоляционных материалов пробивное напряжение при прочих равных условиях максимально при минимальной пористости. На электрическую прочность оказывают влияние также характер распределения пор по размерам, технология изготовления диэлектрика, чистота исходного материала, температура испытаний и др. Кроме того, керамические покрытия обладают большей дефектностью структуры и повышенным содержанием примесей в сравнении с компактным материалом, что также сказывается на уровне электрической прочности.

Пробой неоднородных керамических материалов происходит из-за проводимости газа, заполняющего одну из пор. Напряженность поля в диэлектрике вблизи поры, в которой произошел пробой, значительно увеличивается. При этом пробивается диэлектрик или одна из соседних пор. Если в слое диэлектрика пробиваются две поры, расположенные вблизи друг друга, напряженность поля между ними в 10–100 раз больше средней. При этом эффективная толщина электроизолятора уменьшается и развивается резко неоднородное поле, что приводит к пробую.

Электрическая прочность (E_{np}) пор увеличивается при уменьшении их размера. Например, при уменьшении величины пор от 500 до 10 мкм E_{np} увеличивается от 13,6 до 40 кВ/мм. При исследовании электрической прочности под электрод попадает много различных пор. Разряд,

вызывающий пробой, развивается в наиболее крупной из пор, иначе говоря, электрическая прочность материала определяется размером наиболее крупных пор.

Оксиды тугоплавких металлов – являются хорошими высокотемпературными изоляторами. С ростом температуры их электрическая прочность плавно уменьшается до значений 1–2 кВ/мм при 1250°С. При температурах более 1000 К электрический пробой керамики Al_2O_3 по природе будет тепловым, при более низких температурах -- электрическим. Условия перехода к тепловому пробую определяют в основном два параметра: электропроводность и теплопроводность.

2.4.2. Образцы, оборудование, испытания

Торцевые поверхности дисков – образцов должны быть плоскими и параллельными друг другу. На них не допускается забоин, загрязнений, рисок, вмятин, сколов, коробления. Механические повреждения, полученные при изготовлении образцов из тонких электроизоляторов, могут оказывать большее влияние на результаты испытаний, чем структура материала или электрические параметры испытаний. Для предотвращения перекрытия диаметр образцов должен быть больше 25 мм. Количество образцов должно быть не менее пяти штук на один материал или технологический режим. Если материалы, используемые, полностью восстанавливают свои электрические свойства после испытаний, то один образец можно испытывать многократно. Чистота обработки контактных поверхностей $Ra < 2,5-1,25$ мкм.

Если образцы после кондиционирования испытывают в особых условиях, то для сравнения рекомендуется изготавливать комплект контрольных образцов для исследования в эталонной среде. У толстых образцов электрическую прочность можно определять в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для этого изготавливают образцы с глухими отверстиями, в которые вставляют специальные электроды.

Из-за пористости и специфической структуры некоторые материалы обладают повышенной гигроскопичностью, что снижает их электроизоляционные свойства при температуре в начальный момент испытаний. Для удаления адсорбированной влаги и восстановления электроизоляционных свойств достаточно прогреть образец несколько минут.

Пробивное напряжение определяют на установках, принципиальная схема которых приведена на рис. 2.19. Прибор содержит устройство для плавного регулирования напряжения 1, испытательный трансформатор для повышения напряжения, камеру 3, в которой располагается образец 2 с электродами. Установка должна обеспечивать взаимное прижатие образца и электродов, непрерывную регистрацию напряжения, надежную защиту исследователей от поражения электрическим током.

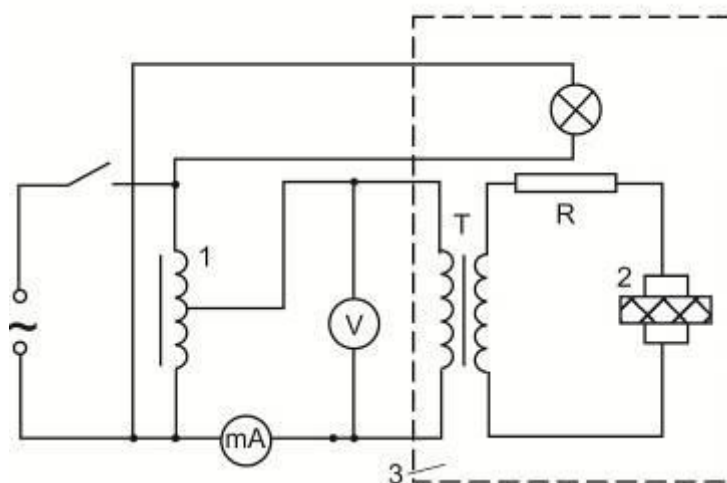


Рисунок 2.19 – Устройство для измерения пробивного напряжения: 1 – трансформатор; 2 – образец; 3 – камера; Т – повышающий трансформатор.

Все серийно выпускаемые установки имеют систему блокировок, исключающих поражение электрическим током. Получение однородного поля требует применения электродов специальной формы. Обычно применяют два цилиндрических электрода разных диаметров с закругленными краями. Материал и размеры электродов влияют на величину пробивного напряжения. Для получения поля, близкого к однородному,

диаметр нижнего электрода должен не менее чем в три раза превышать диаметр верхнего электрода. Электроды изготавливают из меди, латуни или благородных металлов. Шероховатость рабочей поверхности электродов должна быть $Ra \leq 0,20$ мкм. Электродам с большой площадью соответствуют меньшие пробивные напряжения.

Для предотвращения влияния внешних факторов на результаты, образцы нормализуют и кондиционируют. Нормализация - предварительная обработка образцов с целью устранения или частичного снижения влияния предшествующего состоянию покрытия. Кондиционирование – выдержка образцов в заданных условиях окружающей среды в течение определенного периода времени. Эталонная среда – искусственная окружающая среда, созданная для сравнения результатов, полученных при испытаниях материалов в реальных условиях.

Задачи нормализации и кондиционирования: приведение образцов к одинаковым условиям. Температура нормализации должна составлять $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$, относительная влажность воздуха не более 20%, время выдержки - 24 ч. Среду для кондиционирования и испытаний выбирают такой, чтобы она соответствовала или была близкой той, в которой будет работать исследуемый материал. Для нагрева до температур в интервале от -80 до $+400^{\circ}\text{C}$ используют термокамеры (термостаты). Большие температуры могут быть достигнуты в печах. В термовлагокамерах наряду с температурой контролируют и регулируют влажность.

Толщину образцов замеряют до испытаний с точностью до 0,01мм в области контакта с электродами. Рабочие поверхности электродов тщательно осматривают, потемневшие участки зачищают и полируют. Обеспечивают центральное и соосное приложение сжимающего усилия электродов к образцу. Нажатие электродов должно быть достаточным для получения надежного контакта в системе «электрод 1- образец - электрод 2».

Электрическую прочность измеряют при плавном или ступенчатом подъёме напряжения. При плавном подъёме напряжение следует повышать таким образом, чтобы пробой наступил через 10 – 20 с после начала подъема напряжения. При ступенчатом подъёме вначале устанавливают напряжение равное 40% от ранее найденного при плавном повышении напряжения. Затем напряжение увеличивают ступенями, причем на каждой ступени выдержка должна составлять 20 с.

Свидетельством пробоя является либо действительное физическое разрушение образца, либо резкое увеличение тока в цепи. Если при испытаниях происходит поверхностный пробой или перекрытие, рекомендуется в камеру наливать трансформаторное масло (до температуры +90°С) или кремнийорганические жидкости при больших температурах. Число пробоев должно быть не менее пяти. Если при этом отдельные результаты отличаются от величины более чем на 15%, то число пробоев увеличивают до 10 и электрическую прочность находят как среднее из этих измерений.

Электрическую прочность ($E_{пр}$) в кВ/мм вычисляют по формуле:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{\delta} \quad (2.16)$$

где $U_{пр}$ - пробивное напряжение, кВ;

δ - толщина образца в рабочей зоне, мм.

Результаты испытаний, проведенных с электродами различной формы и размеров, при неодинаковых температурах, на образцах разной толщины и других неодинаковых условиях, не могут сопоставляться.

2.5 Удельные объемное и поверхностное электросопротивления

2.5.1. Понятия и определения

Электросопротивление – величина, характеризующая противодействие материала прохождению электрического тока. *Электропроводность* (*электрическая проводимость*) – величина, обратная электросопротивлению.

Ток, протекающий через электроизоляционный материал, делят на поверхностный, проходящий по тонкому поверхностному слою и объемный, проходящий непосредственно через объем материала. К главным параметрам, характеризующим диэлектрики (изоляторы), относят удельное объёмное сопротивление, удельное поверхностное сопротивление и электрическую прочность. Последний параметр рассмотрен в предыдущем разделе. *Удельные объёмное и поверхностное сопротивления* – отношения напряжений к соответствующей плотности тока.

По величине удельного электросопротивления *электропроводные материалы* делят на *проводники* с сопротивлением 10^{-8} - 10^{-6} Ом·м и *слабопроводящие материалы* - 10^{-6} - 10^{+7} Ом·м. Электросопротивление и электропроводность изучают и у изоляторов и у проводников. Наиболее распространёнными электропроводными материалами являются медь, алюминий, железо и их сплавы.

Если прирост электросопротивления обусловлен включением в металлический проводник органических частиц (композиционные материалы), то значение этой характеристики нестабильно из-за возможного разложения частиц при нагреве в процессе эксплуатации. Необходимо также учитывать, что изменения структуры и химического состава у таких материалов могут происходить не только при нагреве, но и при старении.

Наклёп, закалка, облучение частицами высоких энергий приводят к увеличению плотности дефектов кристаллического строения металлов и некоторому увеличению их электрического сопротивления. После рекристаллизационного отжига, приводящего к первоначальной структуре, прежнее электрическое сопротивление сплава восстанавливается. Следует отметить, что даже значительная холодная деформация меди, алюминия,

железа вызывает лишь небольшой рост удельного электрического сопротивления –2-6%.

Сплавы имеют более низкую электрическую проводимость, чем металлы. Причины низкой электропроводности сплавов различны и зависят от их фазового состава. Образование твёрдых растворов внедрения, замещения и вычитания сопровождается искажениями кристаллической решётки растворителя и, как следствие, повышением его электросопротивления.

Электрическая проводимость двухфазных сплавов также ниже, чем у чистых металлов, поскольку двухфазные сплавы характеризуются мелкодисперсной структурой и, соответственно, имеют повышенную протяженность межзеренных границ. Границы зерен обладают более высоким электросопротивлением по сравнению с их объемом, поэтому в мелкозернистых материалах движение электронов затруднено в большей степени, чем в крупнозернистых.

У электропроводников, однофазных твердых растворов, атомы растворенного компонента искажают кристаллическую решетку основного металла. Это приводит к дополнительному рассеиванию электронов проводимости и изменению электронной структуры. Так, легирование медных гальванопокрытий серебром (до 2 – 3 %) понижает их электропроводность почти на 25%, а включение в серебряные покрытия 10% меди уменьшает их электропроводность на 30%.

Электропроводность чистой меди резко уменьшается при наличии даже малых количеств примесей. Из рис. 2.20 видно, как резко падает проводимость меди при незначительном (до 0,1-0,2 %) росте концентрации алюминия, бериллия, железа, мышьяка, железа, кремния, фосфора.

Величина удельных электросопротивлений зависит от пористости, количества примесей и оксидов, анизотропии, наличия трещин, а также от фазовых превращений в проводнике при изменении температуры.

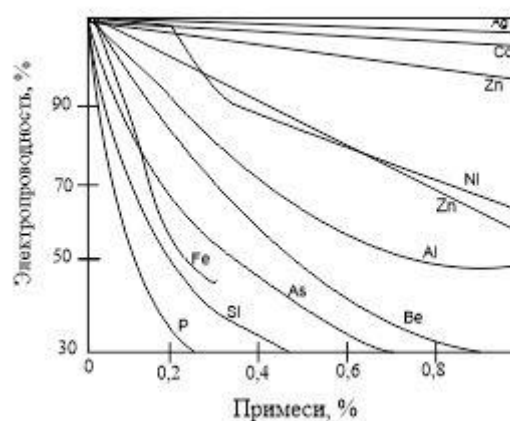


Рисунок 2.20 – Влияние примесей на электропроводность меди

Электрические свойства материалов зависят от температуры испытаний или эксплуатации.

В **таблице** 2.3 приведены рабочие характеристики некоторых сплавов для элементов сопротивления нагревательных приборов .

Табл. 2.3 - Рабочие характеристики стандартных сплавов для нагревательных приборов

Сплав	Состав, %	Удельное электросопротивление, мкОм·см	Наивысшая рабочая температура, °С
X13Ю4 (фехраль)	13,5 Cr; 4.5 Al; остальное Fe	126	1000
0X23Ю5	23 Cr; 5 Al, остальное Fe	137	1200
0X27Ю5А	27 Cr; 5.5 Al; остальное Fe	142	1300
X15Н60	16,5 Cr; 58 Ni, остальное Fe	110	1000
X20Н80	21,5 Cr; остальное	110	1100

	никель		
--	--------	--	--

При изготовлении элементов сопротивления нагревательных приборов может быть применён, кроме указанных в таблице 2.3, широкий круг керамических и композиционных материалов.

Электропроводность наноматериалов с одной стороны должна увеличиваться, так как их кристаллическая решетка свободна от дефектов кристаллического строения, с другой—уменьшаться из-за резкого увеличения протяженности границ зерен, препятствующих движению электронов проводимости. Кроме того, диаметр зерна становится соизмеримым с длиной пробега электронов проводимости. Следовательно, электропроводность наноматериалов определяется рядом конкурирующих факторов. В результате электропроводность наноматериалов обычно оказывается ниже, чем у крупнозернистых аналогов. Переход материала в наноструктурное состояние может сопровождаться как ростом, так и понижением температуры перехода в сверхпроводимость.

Для измерения электросопротивлений и электрической проводимости применяют несколько принципиально различных методов, в которых используют разнообразные образцы.

2.5.2.Сверхпроводимость

Сверхпроводимость - отсутствие электрического сопротивления в материале и выталкивание из него магнитного поля, которое остается в тонком поверхностном слое. При сверхпроводимости электроны проводимости объединяются в единое макроскопически упорядоченное состояние. В этом случае столкновения между электронами и решеткой становятся невозможными, и ток, однажды возникнув, будет существовать и в отсутствие внешнего источника напряжения. Сверхпроводящее состояние

возникает скачкообразно при температуре, которая называется температурой перехода. Выше этой температуры материал находится в обычном состоянии, а ниже ее – в сверхпроводящем.

Сверхпроводимость была обнаружена у многих металлов и сплавов и в некоторых полупроводниковых и керамических материалах, число которых все возрастает. Металлы и сплавы имеют температуры перехода в диапазоне от 0,000325 до 23,2 К. В 1986 году были созданы сверхпроводники из керамических материалов с необычайно высокой температурой перехода. Так, для образцов керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ температура перехода превышает 90 К. В настоящее время сверхпроводящие материалы применяют в сверхпроводящих магнитных системах, электроэнергетике, управляемых термоядерных реакторах. Перспективно применение таких материалов в сверхпроводящих линиях электропередач.

2.5.3. Образцы, оборудование, испытания

Основой для измерения электрических проводимости и сопротивлений является закон Ома. Рассмотрим сначала испытания электроизоляционных материалов. Электрические сопротивления таких образцов оценивают прямыми и косвенными измерениями. При прямых измерениях используют мегаомметры и тераомметры. Величину сопротивления в этом случае считают непосредственно со шкалы прибора. Из косвенных можно отметить метод измерения тока, протекающего через образец при фиксированном напряжении на последнем.

У образцов шлифуют обе торцевые (контактные) плоскости. На один режим изготавливают не менее трех образцов. Если образцы подвергают кондиционированию и испытывают в особых условиях, то для сравнения рекомендуется изготавливать комплект контрольных образцов для исследования в эталонной среде.

Принципиальная схема стандартной установки для испытаний приведена на рис.2.21.

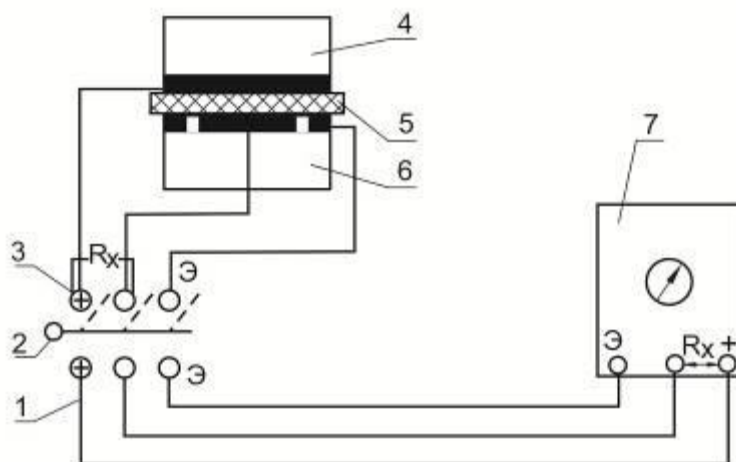


Рисунок 2.21. – Устройство для определения удельных электросопротивлений (названия электродов даны для определения удельного объемного сопротивления): 1 - переносные контакты измерительного прибора; 2 - ключ; 3 - контакты измерительного устройства; 4 - потенциальный электрод; 5 - образец; 6 - измерительный и охранный электроды; 7 - измерительный прибор

Перед испытанием для улучшения контакта электродов с керамическим образцом их рекомендуется притирать, предварительно нанеся на поверхность тонкий слой вазелина, трансформаторного масла или кремнийорганической жидкости. Выбор смазки обуславливается температурой испытаний: вазелин от -40 до $+180$ °С, кремнийорганические жидкости и масла от -60 до $+250$ °С.

Толщину образца измеряют микрометром с погрешностью не более $0,01$ мм в четырех точках на рабочей поверхности образца: в центре и на равных расстояниях от центра. Результаты замеров усредняют.

Измерения снимают через 3с после подачи напряжения. Контрольные образцы испытывают в эталонной среде: относительная влажность воздуха 65%, температура 20 °С, атмосферное давление 760 мм рт.ст.

Удельное объемное сопротивление (ρ_v) в Ом мм и удельное поверхностное сопротивление (ρ_s) в Ом вычисляют по формулам:

$$\rho_v = \pi \frac{D_0^2}{4\delta} R_v \quad (2.17)$$

$$\rho_s = \pi \frac{D_0}{q} R_s \quad (2.18)$$

где δ - толщина образца, мм;

R_v – объемное сопротивление, Ом;

R_s – поверхностное сопротивление, Ом;

q – ширина зазора между измерительным и потенциальным электродами, мм;

D_0 – средний диаметр, измерительного или потенциального электродов вычисляемый соответственно по формулам:

$$D_0 = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2.19)$$

$$D_0 = \frac{d_1 + d_3}{2} \quad (2.20)$$

где d_1 – диаметр измерительного электрода, мм;

d_2 – внутренний диаметр охранного электрода, мм;

d_3 – внутренний диаметр потенциального электрода, мм;

Электрическое сопротивление металлов и сплавов часто измеряют по методу двойного моста. Принципиальная схема двойного моста приведена на **рис. 2.22**. В этой схеме измеряемое сопротивление R_x соединяется с эталонным R_N амперметром, источником питания и регулировочным сопротивлением R_p . Параллельно этой ветви в схеме находятся вторая ветвь, состоящая из сопротивлений R_1 и R_3 , и третья ветвь, включающая дополнительные сопротивления R_2 и R_4 . Причем R_1 , R_2 , R_3 , R_4 имеют сопротивления много больше, чем сопротивления соединительных проводов

и контактов. R_N стараются подобрать близким по величине к R_x . Эти сопротивления должны быть много меньше, чем R_1 , R_2 , R_3 и R_4 .

Подобрав условия, когда $R_1/R_2 = R_3/R_4$, можно считать, что

$$R_x = R_N(R_1/R_3) \quad (2.21).$$

Определение сопротивления сводится к уравниванию моста путем вариации R_1 – R_2 , при этом значения R_3 и R_4 остаются во время измерения неизменными.

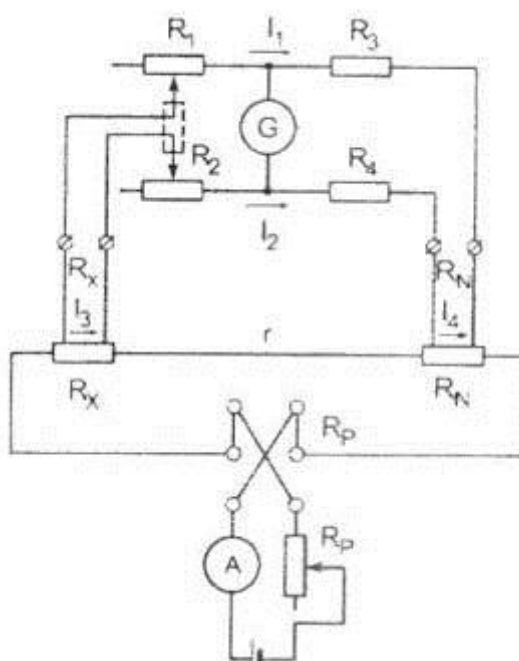


Рисунок 2.22 – Принципиальная схема двойного моста

Метод двойного моста достаточно распространен и универсален.

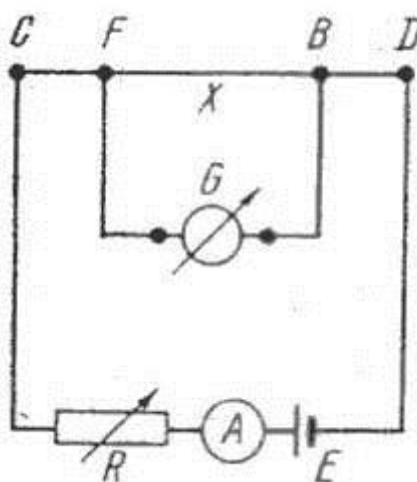


Рисунок 2.23 – Схема установки для измерения электрического сопротивления методом амперметра- вольтметра.

Закон Ома также позволяет определять электрическое сопротивление металлических проводников ещё одним, достаточно простым методом -- амперметра-вольтметра (рис. 2.23). Металлический образец X присоединяется в точках С и D к источнику постоянного тока E; последовательно с ним включается амперметр А и регулировочное сопротивление R. Параллельно образцу X в его точках F и В подключается вольтметр с внутренним сопротивлением G, измеряющий разность потенциалов $U_f - U_b$. Измерив величины тока и напряжения, по закону Ома вычисляют электросопротивление.

2.6 Теплопроводность

2.6.1. Понятия и определения

Теплопроводность – один из видов теплообмена, при котором перенос теплоты в материале происходит на атомно-молекулярном уровне. С физической точки зрения явление теплопроводности представляет собой перенос кинетической энергии. В металлических кристаллах перенос тепловой энергии в общем случае осуществляется двумя типами носителей: электронами проводимости и колебаниями кристаллической решётки (фононами). Соответственно различают *электронную* (λ_e) и *решеточную* (λ_ϕ) составляющие теплопроводности. Превалирующим механизмом теплопроводности металлов и сплавов является перенос тепла электронами проводимости, решеточная теплопроводность чистых металлов мала, приблизительно в 30 раз меньше электронной. Именно в связи с этим высокая теплопроводность, как и электропроводность, является характерным признаком металлического состояния.

В общем случае теплопроводность металлов является суммой решеточной и электронной теплопроводностей:

$$\lambda = \lambda_{\phi} + \lambda_e \quad (3.27)$$

Теплопроводность неметаллических твердых тел (ионных и ковалентных кристаллов), обусловленная распространением колебаний кристаллической решетки, на 1 – 2 порядка ниже теплопроводности металлов.

Теплопроводность материалов является структурно – чувствительной характеристикой. Она зависит от пористости, наличия микротрещин, оксидов (для металлических материалов), размера частиц и площади пятна контакта частиц (для порошковых материалов) и т.д. Теплопроводность материалов может меняться при эксплуатации в высокотемпературной среде или при поверхностной обработке, например, лазером из-за спекания и уменьшения пористости.

Исследователи свойств наноматериалов Д. И. Рыжонков с сотр. полагают, что вклад различных факторов в теплопроводность отличен от крупнозернистых аналогов. Это обусловлено, в частности, особенностями наноструктуры. Например, в равновесном состоянии внутри наночастиц практически отсутствуют дислокации и вакансии. Поэтому на этих дефектах не будет происходить рассеяния фононов. Примесные атомы не распределены равномерно в объеме наночастицы, и рассеяние на них фононов не может быть определяющим. Поэтому у наноматериалов уравнение решеточной теплопроводности отлично от крупнозернистых аналогов. Смена механизмов рассеяния фононов при уменьшении размера наночастиц сопровождается падением теплопроводности.

В общем виде изменение теплопроводности материалов при нагреве можно выразить формулой

$$\lambda_t = \lambda_0 (1 + \alpha T), \quad (2.23)$$

где α - температурный коэффициент теплопроводности. Эта величина для компактных материалов обычно имеет отрицательный знак, так как при нагреве теплопроводность понижается.

На рис. 2.24 приведены температурные зависимости некоторых металлов.

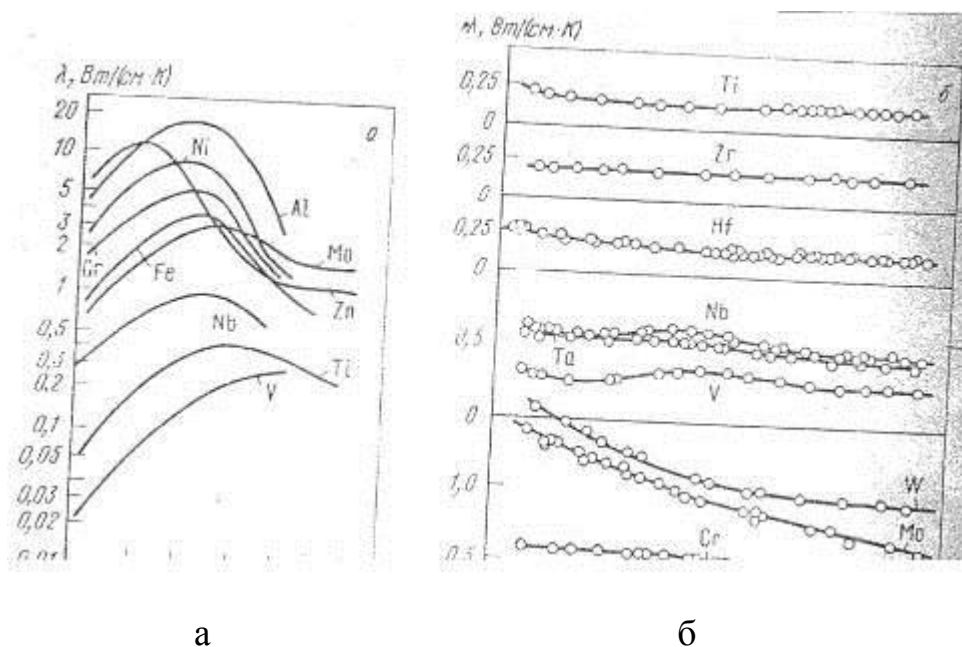


Рисунок 2.24 – Теплопроводность при низких (а) и высоких (б) температурах некоторых металлов

На рис. 2.25 приведены теплопроводности некоторых керамик. Из рисунка видно, что при высоких температурах различие теплопроводности у керамик невелико.

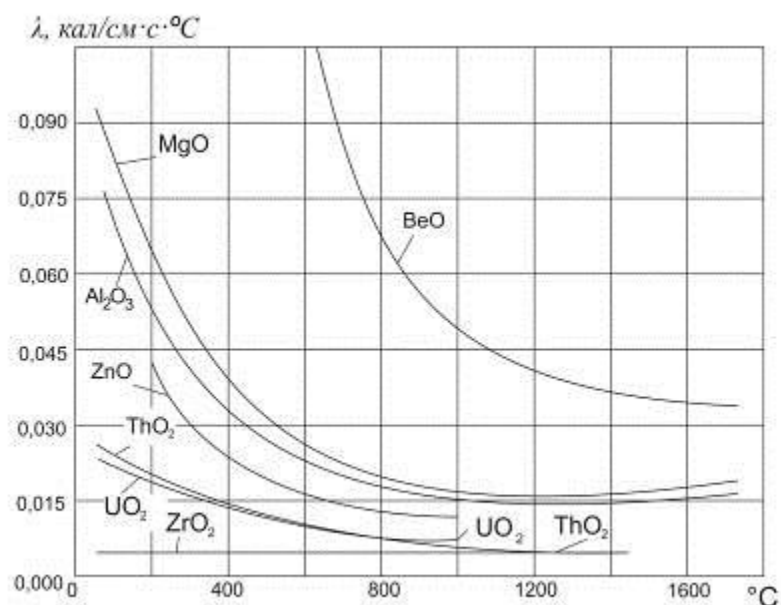


Рисунок 2.25 – Теплопроводность оксидов (в пересчёте на нулевую пористость)

2.6.2. Образцы, оборудование, испытания

Все образцы перед испытаниями следует нормализовать. Теплопроводность определяют не менее чем на трех образцах одинаковых размеров, с идентичной структурой. Температура на наружной поверхности образца должна быть как можно более близкой к эксплуатационной температуре реального изделия.

Электродпечь разогревают плавно со скоростью не более 500°С/час, так чтобы при нагреве из-за термических напряжений не произошло нарушения сплошности исследуемого материала. Температура нагрева образца не должна вызывать в нём структурных и фазовых превращений, если это не предусмотрено задачами исследования.

Теплопроводность материалов исследуют различными способами (ГОСТ 7076, ГОСТ Р ИСО 12987). Наибольшее распространение приобрели стационарные методы. Их сущность заключается в том, что температура в

отдельных точках измеряемого стержня (образца) не меняется в процессе эксперимента, а температура любой точки зависит только от ее координат, но не от времени. При этом формируется установившийся тепловой поток.

Стационарные методы делятся на абсолютные и относительные. В абсолютных методах теплопроводность определяют, предварительно измерив распределение температур в образце и количество перенесенной теплоты. В относительных методах сравнивают температурные поля в исследуемом материале и эталонном, заранее изученном материале, а теплопроводность образца определяют, сопоставляя его с эталоном.

Типовое измерительное устройство для измерения теплопроводности материалов стационарным абсолютным методом, схематически изображено на рис. 2.26.

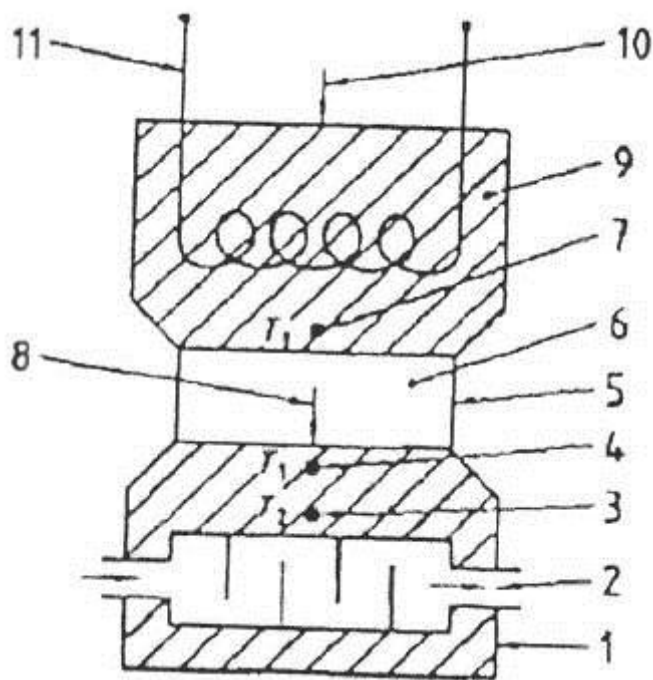


Рисунок 2.26 – Схема типового устройства для измерения теплопроводности материалов: 1 - нижний термоблок; 2 - вода, циркулирующая в нижнем термоблоке; 3 - дифференциальная термопара, элемент T_2 ; 4 - дифференциальная термопара, элемент T_1 ; 5 - изоляционный

цилиндр; 6 - образец; 7 - дифференциальная термопара, элемент T_3 ; 8 - направление теплового потока; 9 - верхний термоблок; 10 - нагрузка; 11 - нагревательный элемент.

Для определения теплопроводности при средних температурах (до 500 °С) испытуемый образец помещают между нагревателем и водяным калориметром, который служит холодильником. По нагреву воды в холодильнике судят о количестве теплоты, прошедшей за определенный промежуток времени по образцу. Измеряя установившуюся разность температур термопарами между точками, лежащими на известном расстоянии, и зная сечение стержня, можно рассчитать теплопроводность образца.

Рассмотрим подробнее подобную установку для оценки теплопроводности керамических покрытий стационарным абсолютным методом (рис.2.27)

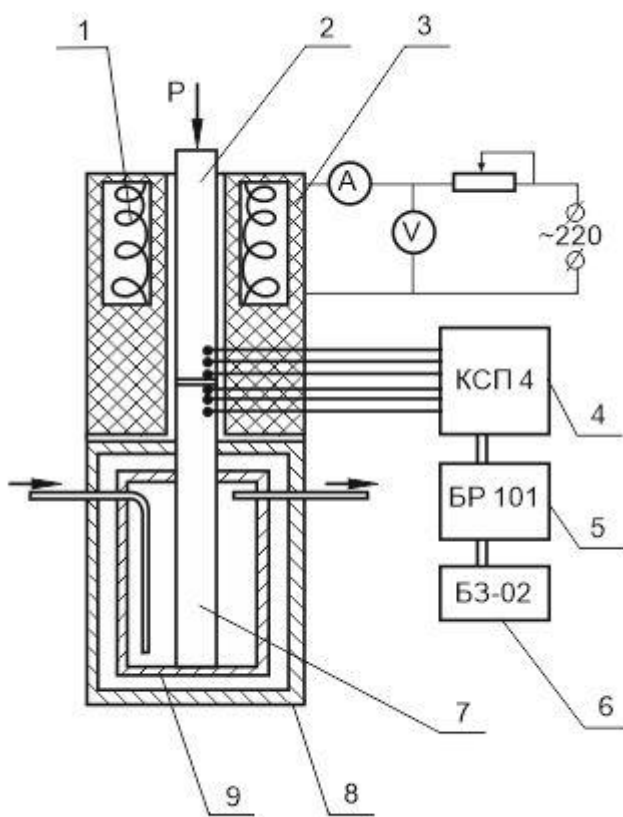


Рисунок 2.27 – Установка для определения теплопроводности покрытий абсолютным методом: 1 - нагреватели; 2 - образец; 3 - электропечь; 4 - потенциометр; 5 - блок реле; 6 - блок задачи; 7 - контрообразец; 8 - термос; 9 - внутренний стакан термоса

Для создания теплового потока в системе "основной металл - покрытие - контрообразец" применяется трубчатая электропечь, в которой нагреватели (спирали) расположены так, что образец нагревается только в верхней половине печи, где находятся спиральные нагреватели, тогда как в нижней - асбестовая теплоизоляция и термопреобразователи для измерения температуры образца по его длине. Термос, необходимый для охлаждения контрообразца и определения теплового потока, прошедшего через покрытие, представляет собой два изолированных стакана. Во внутренний стакан подается вода. Температура воды на входе и выходе из термоса измеряется медь-константановыми термопреобразователями. Для обеспечения достаточного контакта рабочих торцевых поверхностей контрообразца и образца к последнему прикладывается усилие P не менее 500 Н.

Обеспечив необходимый прогрев образца и стационарность теплового потока, можно снимать показания всех термопреобразователей. Для каждого образца в каждой точке определяют не менее трех температур через каждые 20 мин. Одновременно фиксируют температуру воды на входе и выходе.

По результатам исследований строят график распределения температур в системе "основной металл - покрытие - контрообразец" (рис.2.28).

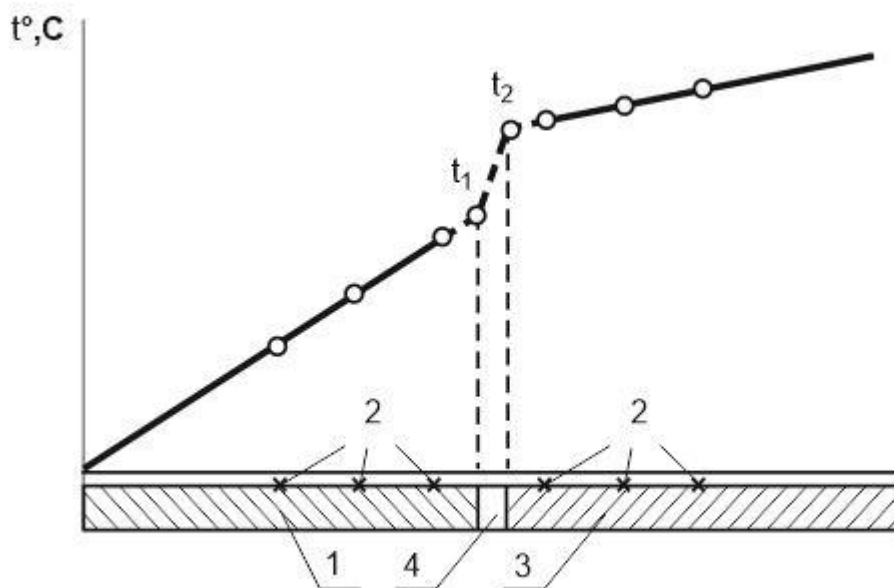


Рисунок 2.28 – Распределение температур в системе "основной металл - покрытие - контрообразец" по длине: 1 - контрообразец; 2 - места установки термопреобразователей; 3 - основной металл; 4 - покрытие

По графику методом экстраполяции определяют температуры на внутренней и внешней поверхностях образца. Теплопроводность λ , Вт/(м·К) вычисляют по формуле

$$\lambda = \frac{Q\delta}{S(t_2 - t_1)} ; \quad (2.24)$$

$$Q = CV\Delta t , \quad (2.25)$$

где Q - тепловой поток, проходящий через образец, Вт;

$C = 4,19 \cdot 10^3$ - удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К);

V - массовый расход воды, проходящей через термос, кг/с;

$\Delta t = t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}$ - повышение температуры воды в термосе, °С;

$t_{\text{вх}}, t_{\text{вых}}$, - температуры воды на входе и выходе из термоса, °С;

S – площадь образца, м²;

t_2, t_1 - температура на внутренней и внешней поверхностях образца, °С.

Т.Б.Бузовкина с сотр. определяли теплопроводность, используя стационарный относительный метод измерения. Относительные методы измерения применяют реже абсолютных стационарных. При этом достигается упрощение за счет сравнения температурных полей в исследуемом образце в эталонном, заранее изученном материале. По эталонному образцу измеряют полный тепловой поток. При оценке теплопроводности обычно в качестве эталона используют плавленый кварц. Его теплопроводность многократно определяли, он обладает высокой стабильностью и может работать в интервале температур от 100 до 1700 К.

В экспериментальной установке (рис. 2.29) дисковый образец толщиной 3 – 4 мм и диаметром 23 – 25 мм установили между эталонами из плавленого кварца. Теплопроводность измеряли в условиях лучистого нагрева от силитовых стержней.

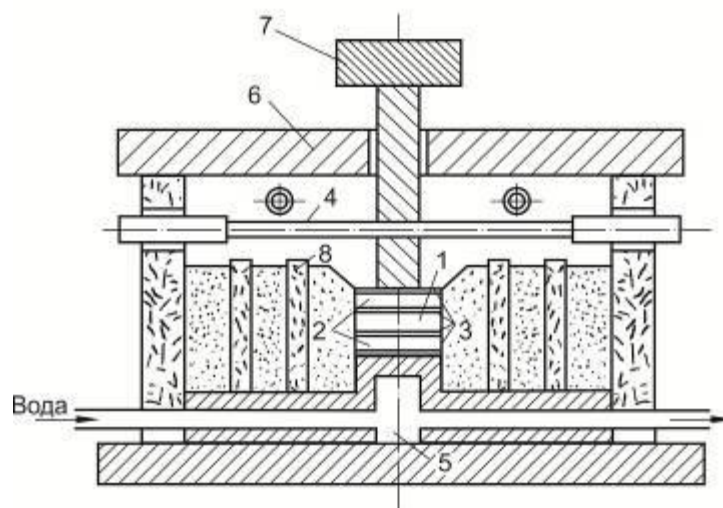


Рисунок 2.29 - Установка для измерения теплопроводности стационарным относительным методом: 1 – образец; 2 – эталон (плавленный кварц); 3 – термопреобразователи; 4 – силитовые стержни; 5 – холодильник; 6 – крышка; 7 – груз; 8 – кольца.

Для уменьшения радиального отвода тепла систему из образца и кварцевых дисков окружали тремя защитными концентрическими кольцами из асбоцемента и засыпкой из кварцевого песка. Температурные перепады в установившемся режиме фиксировали четырьмя платино-платинородиевыми термопарами. Систему из образца и термопар располагали на медном холодильнике и прижимали к нему грузом для уменьшения переходного контактного сопротивления между образцом, эталонами и термопарами. Тепловая изоляция обеспечивала расхождение между тепловыми потоками через первый и второй эталонные образцы не более чем на 4 %.

Погрешности определения теплопроводности материала связаны с несоблюдением условий стационарности теплового потока, неверной оценкой распределения температур в образце, с влиянием контактного теплового сопротивления между образцом и термопарой и др. Для повышения точности рекомендуется увеличить усилие, прижимающее образец к контрообразцу, используя для этого пресс.

В современных установках на верхнюю поверхность образца подают импульс энергии от ламповой вспышки и фиксируют рост температуры на обратной стороне при помощи высокоскоростного пирометра. Систему применяют для контроля качества металлических, керамических, аморфных и др. материалов.

Наряду с коэффициентом теплопроводности имеет существенное значение коэффициент температуропроводности α , который выражается следующим образом:

$$\alpha = \lambda / \rho c, \quad (2.26)$$

где: λ теплопроводность;

ρ - плотность;

c - теплоемкость.

Коэффициент температуропроводности в тепловых процессах характеризует скорость изменения температуры. Чем больше α , тем больше температурная разность в отдельных местах внутри тела при одинаковых условиях нагрева и охлаждения.

2.7 Температурный коэффициент линейного расширения

2.7.1. Понятия и определения

Термическое (тепловое) расширение - увеличение размеров тела при нагревании при постоянном давлении. Термическое расширение обусловлено увеличением межатомного расстояния в кристаллической решётке. *Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР)* характеризует относительное приращение длины образца, вызванное повышением его температуры от нижней до верхней границы температурного интервала, отнесенное к величине этого интервала. ТКЛР являются периодической функцией порядкового номера элементов в периодической системе Д. И. Менделеева. Согласно уравнения состояния Ми-Грюнаизена ТКЛР связан с

другими характеристиками твёрдого тела (давлением, температурой, объёмом).

Вклад колебаний атомов кристаллической решётки в ТКЛР у всех металлов положителен. У веществ с ионной связью (углерод, кремний, германий и др.) в некотором интервале низких температур ТКЛР решётки имеет отрицательное значение. Это означает, что при охлаждении в этом интервале сначала происходит расширение, а затем сжатие (у кремния интервал отрицательных значений ТКЛР составляет 18-120 К).

ТКЛР алюминиевых сплавов, уменьшается при растворении в них меди, кремния, никеля, железа и бериллия, т. е. элементов с меньшим ТКЛР, чем у растворителя. Это же относится к меди при растворении в ней палладия, никеля. Наоборот, при растворении цинка и олова в меди ТКЛР растёт, так как у растворённых компонентов он больше, чем у меди.

У железа и сплавов на его основе при $\alpha \rightarrow \gamma$ переходе ТКЛР резко возрастает, так как гамма-железо, имеющее меньший удельный объём, чем альфа-железо, интенсивнее расширяется при нагреве. Поэтому аустенитные стали имеют значительно более высокий ТКЛР, чем стали перлитного и мартенситного классов.

В зависимости от величины выбранного интервала температур ТКЛР определяют либо в минимальном, либо в установленном интервалах. Средний ТКЛР в установленном интервале температур будет отличаться в большую или меньшую сторону от коэффициента, определенного в минимальном интервале температур или в другом интервале. Следовательно, замена одного коэффициента другим при вычислениях или при выборе материала покрытия и основного металла не всегда правомерна. В отличие от монолитных металлов, ТКЛР которых является постоянной теплофизической величиной, аналогичная характеристика порошковых керамических образцов определяется несколькими факторами. ТКЛР в этом случае зависит не только от температурного интервала испытаний, но и от скорости нагрева,

пористости, наличия фазовых превращений в материале при нагреве. Кроме того, на ТКЛР оказывает влияние анизотропия, поэтому образцы испытывать следует с учетом главных осей анизотропии.

ТКЛР металлов лежит в интервале (10^6 K^{-1}) для:

углеродистых сталей – 12...14,

жаропрочных сплавов на никелевой основе- 9,7... 9,2,

хромоникелевых нержавеющей сталей – 15...20,

керамик - 8...9.

Среди керамик оксид алюминия имеет достаточно высокий ТКЛР и поэтому склонен к растрескиванию под действием термических напряжений, а диоксид циркония нуждается в стабилизирующих добавках для подавления разрушительного фазового превращения при 1000 с. Карбид и нитрид кремния имеют низкий ТКЛР, однако их окисление при высоких температурах сопровождается выделением газов CO или N₂.

Значения ТКЛР покрытия и основного металла всегда сопоставляют у ответственных деталей, эксплуатируемых при высоких температурах, например, лопаток газовых турбин. Так, массивная часть газовой турбины нагревается и остывает значительно медленнее, чем её тонкие лопатки. Теплозащитные покрытия, нанесенные на металлические рабочие поверхности, при этом из-за различия ТКЛР могут растрескиваться, а лопатки разрушаться.

Методы определения ТКЛР основаны на нагревании образца и измерении его (образца) длины, изменяющейся под влиянием температуры.

2.7.2. Образцы, оборудование, испытания

Форму и размеры образцов выбирают с учетом конструкции измерительного прибора. Предпочтительными являются стандартные образцы квадратного сечения длиной (50 ± 5) мм со стороной квадрата $(4,00 \pm 0,5)$ мм (рис. 2.30). Поверхности образцов шлифуют, не допуская наличия трещин, расслоения, раковин.

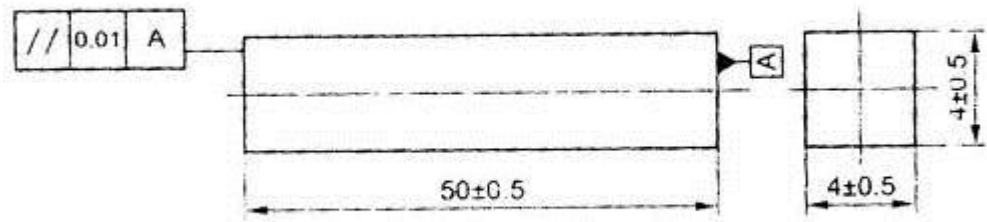


Рисунок 2.30 - Образец для измерения ТКЛР

Для регистрации изменений длины применяют механические, оптические и электрические дилатометры. Приборы должны обеспечивать изменение температуры в стационарном или нестационарном режимах, а также термостатирование в выбранных интервалах температур. В системе, передающей расширение образца для индикации, необходимо предусмотреть компенсацию собственного температурного расширения. Систему передачи, а также приспособление для установки образца в приборе желательно изготавливать из материалов с минимальным ТКЛР, например, плавленного кварца. Изменение длины образца контролируют с использованием автоматического устройства.

Существует несколько конструкций, дилатометров, в которых линейное перемещение преобразуется в электрический сигнал с помощью фотоэлектрических устройств, а также различных датчиков – тензометрических, индукционных или емкостных. На основе таких преобразователей созданы, автоматические дилатометры с программным управлением и дилатометры для фиксирования быстропротекающих процессов при скоростном нагреве или охлаждении. На рис. 2.31 показана функциональная схема автоматического дилатометра.

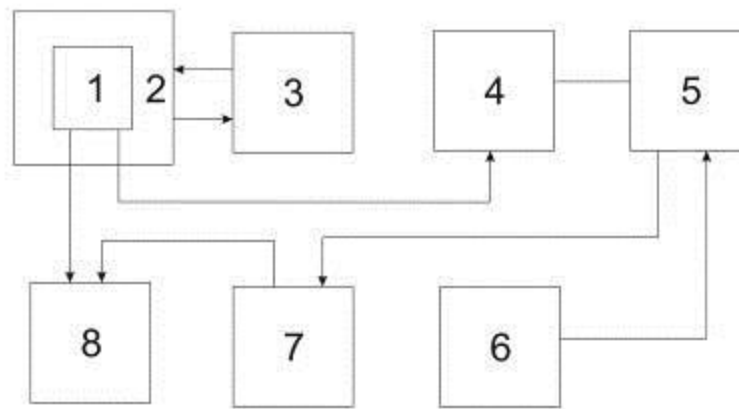


Рисунок 2.31 - Схема автоматического дилатометра: 1 – образец; 2 – термостат; 3 – блок управления тепловым режимом; 4 – измеритель перемещения с электрическим преобразователем; 5 – суммирующая схема; 6 – блок коррекции; 7 – функциональный преобразователь напряжения; 8 – двухкоординатный электронный потенциометр.

Большинство дилатометров снабжены средствами контроля температуры образцов, а иногда и устройствами, задающими определенную программу нагрева (охлаждения) или изотермической выдержки. Для определения температур в дилатометрах используют термопары, а во многих конструкциях – дилатометрические пирометры, т.е. образцы - эталоны, характеризующиеся плавным изменением коэффициента расширения при нагреве или охлаждении. По величине расширения (сжатия) эталона можно точно определить их температуру.

Достоинством таких дилатометрических пирометров является безынерционность и более точная оценка температуры образца, нагреваемого в тех же условиях, что и эталон, поскольку он фиксирует температуру не в какой – либо одной точке, а усредненную по всей длине образца. Дилатометрические пирометры являются неотъемлемой частью так называемых дифференциальных дилатометров, в которых одновременно фиксируется расширение эталона и исследуемого образца.

ТКЛР можно определять также с использованием распространенных ёмкостного или интерференционного дилатометров. Работа ёмкостного дилатометра основана на изменении ёмкости конденсатора, одна из пластин которого связана с исследуемым образцом и смещается при его удлинении. Измерения ТКЛР на интерференционном дилатометре связаны со смещением зеркала в приборе Линника и изменении интерференционной картины вследствие удлинения образца при нагреве. В металловедческих исследованиях широко используют дифференциальный дилатометр Шевенара. Его применяют для изучения кинетики превращений в стали при термической обработке (закалке и отпуске).

Наиболее точные результаты получают при исследованиях на дифференциальных дилатометрах, которые исключают ошибки, вызываемые удлинением элементов для крепления образцов.

Диапазон исследуемых температур дилатометрами ограничивается термической стойкостью кварца для тех приборов, в которых кварц используется для изготовления опор, стержней и трубок.

Перед испытаниями определяют погрешности измерения дилатометра в интервалах, исследуемых температур. Определяют ТКЛР образцовой дилатометрической меры (из монокристаллического корунда или другого материала), аттестованной в соответствующем порядке. Если поправки превышают допустимые значения, то применение прибора недопустимо – необходимы дополнительные юстировка и поверка. Погрешности прибора вычисляют через каждые 25 циклов измерения, а также после ремонта дилатометра.

ТКЛР определяют в стационарном и нестационарном режимах нагревания. Каждый образец испытывают только один раз. Минимальный интервал испытаний - 100°C .

ТКЛР (α_{t-t_1}) в K^{-1} вычисляют по формуле:

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta t} + \bar{\alpha} K(t_2 - t_1) \quad (2.27)$$

где Δl – измерение длины образца в данном интервале температуры, мм;

l_0 – начальная длина образца, мм;

Δt – разность конечной (t_2) и начальной (t_1) температур, К ($^{\circ}\text{C}$);

$\alpha_K (t - t_0)$ – среднее значение коэффициента поправки прибора для заданного интервала температур ($t_2 - t_1$).

2.8 Магнитные свойства

2.8.1. Понятия и определения

ГОСТ 19693 устанавливает применяемые в науке, технике и производстве термины и определения основных понятий магнитных материалов и их свойств (табл. 2.4).

Табл. 2.4 - Термины и определения основных понятий магнитных материалов и их свойств по ГОСТ 19693.

Термин	Определение
1. <i>Диамагнетик</i>	Вещество, атомы, ионы или молекулы которого не имеют результирующего магнитного момента при отсутствии внешнего магнитного поля.
2. <i>Парамагнетик</i>	Вещество, атомы, ионы или молекулы которого имеют результирующий магнитный момент при отсутствии внешнего магнитного поля.
3. <i>Ферромагнетик</i>	Кристаллическое вещество, в котором магнитные моменты

4. Антиферромагнетик

5. Ферримагнетик

6. Магнитный материал

атомов или ионов находятся в состоянии самопроизвольного магнитного упорядочения, причем результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля

Кристаллическое вещество, в котором магнитные моменты атомов или ионов находятся в состоянии самопроизвольного магнитного упорядочения, причем результирующие магнитные моменты каждого из доменов равны нулю

Кристаллическое вещество, магнитную структуру которого можно представить в виде двух или более подрешеток, магнитные моменты атомов или ионов которых находятся в состоянии самопроизвольного магнитного упорядочения, причем результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля

Материал, обладающий

7. Домен

свойствами ферромагнетика или ферримагнетика

8. Доменная граница

Область в магнитном материале или антиферромагнетике, имеющая пространственно однородное упорядочение магнитных моментов атомов или ионов

9. Магнитная анизотропия

Переходная область между соседними доменами, в которой магнитные моменты атомов или ионов постепенно меняют свое пространственное упорядочение от упорядочения, соответствующего одному домену, до упорядочения соседнего

10. Энергия магнитной анизотропии

Неодинаковость магнитных свойств в магнитном материале в различных направлениях

Энергия, складывающаяся из энергии магнитных взаимодействий между электронами, энергии упругих напряжений и энергии

11. *Константа магнитной анизотропии*

магнитострикционных
напряжений в кристалле

Один из коэффициентов при разложении свободной энергии магнитной анизотропии в ряд по степеням направляющих косинусов углов вектора самопроизвольной намагниченности относительно кристаллографических осей кристалла

12. *Ось легкого намагничивания*

Кристаллографическая ось, при намагничивании вдоль которой напряженность магнитного поля, необходимого для достижения намагниченности технического насыщения, минимальна

13. *Ось трудного намагничивания*

Кристаллографическая ось, при намагничивании вдоль которой напряженность магнитного поля, необходимого для достижения намагниченности технического насыщения, максимальна

14. *Внутреннее эффективное*

Поле сил, действующее на

магнитное поле

моменты электронов,
определяющих магнитное
состояние вещества, и зависящее
от внешнего магнитного поля,
обменного взаимодействия,
магнитной анизотропии и
размагничивающих полей

15. *Точка Кюри*

Критическая температура, выше
которой ферромагнетик
(ферримагнетик) становится
парамагнетиком

16. *Точка Нееля*

Критическая температура, выше
которой антиферромагнетик
становится парамагнетиком

17. *Точка компенсации ферримагнетика*

Температура, при которой
магнитные моменты подрешеток
ферримагнетика взаимно
компенсируются

18. *Магнитомягкий материал*

Магнитный материал с
коэрцитивной силой по индукции
не более 4 кА/м

19. *Магнитотвердый материал*

Магнитный материал с
коэрцитивной силой по индукции

2.8.2. Магнитная индукция и магнитная проницаемость

Магнитная индукция B – характеристика результирующего магнитного поля в веществе, образующегося за счет собственной намагниченности и воздействия внешнего поля

Магнитная проницаемость μ – это величина, характеризующая магнитные свойства материала. Она показывает, во сколько раз увеличивается индукция в магнитном материале по сравнению с индукцией внешнего магнитного поля. *Ферромагнитные металлы* железо, никель, кобальт и их сплавы обладают очень высокими максимальными проницаемостями – от 5000 (для Fe) до 800 000 (для супермаллоя). В таких материалах при сравнительно малых напряженностях поля H возникают большие индукции B , но связь между этими величинами нелинейна из-за явлений насыщения и гистерезиса. Ферромагнитные материалы сильно притягиваются магнитами. Они теряют свои магнитные свойства при температурах выше точки Кюри (770 °С для Fe, 358 °С для Ni, 1120 °С для Co) и ведут себя как парамагнетики, для которых индукция B вплоть до очень высоких значений напряженности H пропорциональна ей.

Многие элементы и соединения являются парамагнитными при всех температурах. Парамагнитные вещества характеризуются тем, что намагничиваются во внешнем магнитном поле; если же это поле выключить, парамагнетики возвращаются в ненамагниченное состояние. Намагниченность в ферромагнетиках сохраняется и после выключения внешнего поля.

На рис. 2.32 представлена типичная петля гистерезиса для магнитотвердого ферромагнитного материала. Она характеризует неоднозначную зависимость намагниченности магнитоупорядоченного материала от напряженности намагничивающего поля. С увеличением

напряженности магнитного поля от исходной (нулевой) точки (1) намагничивание идет по штриховой линии 1–2, причем величина μ существенно изменяется по мере того, как возрастает намагниченность образца. В точке 2 достигается насыщение, т.е. при дальнейшем увеличении напряженности намагниченность больше не увеличивается. Если теперь постепенно уменьшать величину H до нуля, то кривая $B(H)$ уже не следует по прежнему пути, а проходит через точку 3, обнаруживая гистерезис (hysteresis-отставание, запаздывание). Очевидно, что при этом сохраняется некоторая остаточная намагниченность (отрезок 1–3). После изменения направления намагничивающего поля на обратное кривая $B(H)$ проходит точку 4, причем отрезок 1–4 соответствует коэрцитивной силе, препятствующей размагничиванию. Дальнейший рост значений $(-H)$ приводит кривую гистерезиса в участок 4–5. Следующее за этим уменьшение величины $(-H)$ до нуля и затем возрастание положительных значений H приведет к замыканию петли гистерезиса через точки 6, 7 и 2.

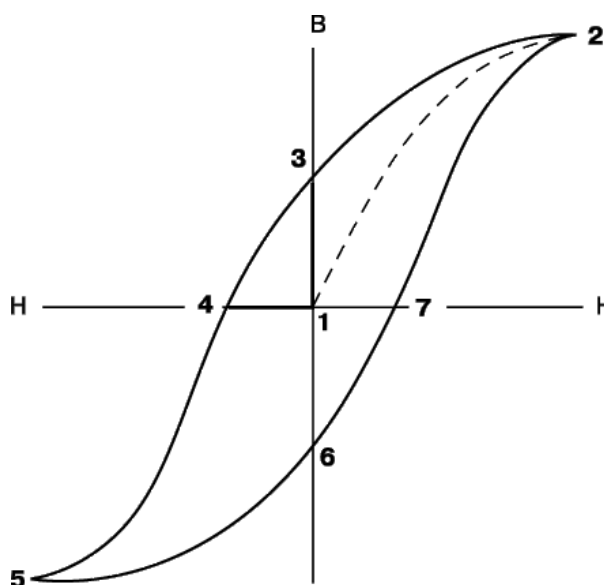


Рисунок 2.32 – Типичная петля гистерезиса для магнитотвердого ферромагнитного материала.

Магнитотвердые материалы характеризуются широкой петлей гистерезиса, охватывающей значительную площадь на диаграмме и потому соответствующей большим значениям остаточной намагниченности

(магнитной индукции) и коэрцитивной силы. Узкая петля гистерезиса (рис. 2.33) характерна для магнитомягких материалов – таких, как мягкая, отожженная низкоуглеродистая сталь и специальные сплавы с большой магнитной проницаемостью. Такие сплавы были созданы с целью снижения обусловленных гистерезисом энергетических потерь. Большинство подобных специальных сплавов, как и ферриты, обладают высоким электрическим сопротивлением, благодаря чему уменьшаются не только магнитные потери, но и электрические, обусловленные вихревыми токами.

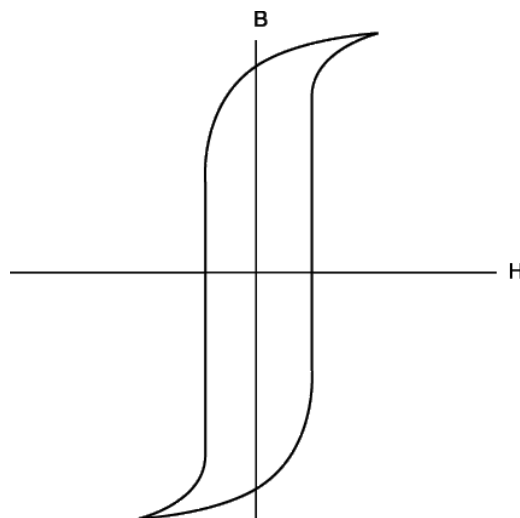


Рисунок 2.33 – Узкая петля гистерезиса магнито-мягких материалов

2.8.3. Магнитные материалы и их применение

Магнитотвердые материалы используют для изготовления постоянных магнитов. Качество таких материалов определяется произведением остаточной индукции и коэрцитивной силы. Чем больше это произведение, тем более подходит материал для постоянных магнитов.

Магнитомягкие материалы используют в электротехнике для изготовления магнитопроводов в электромагнитах, трансформаторах, электрических машинах.

Для уменьшения потерь на гистерезис выбирают материалы с пониженной коэрцитивной силой, а для уменьшения вихревых токов магнитопроводы собирают из отдельных пластин и используют металлы с повышенным удельным электросопротивлением. Уменьшение

электродвижущей силы самоиндукции в каждой из отдельных пластин и использование металлов с повышенным удельным сопротивлением приводит к уменьшению общих потерь.

Основой широко используемых в электротехнике магнитных материалов является низкоуглеродистая электротехническая сталь. Она выпускается в виде листов, толщиной от 0,2 мм до 4 мм, содержит не выше 0,04% углерода и не выше 0,6% других примесей.

Если к железу добавить никель, то полученные материалы будут обладать повышенной магнитной проницаемостью. Такие сплавы называются пермаллои, их используют для изготовления сердечников малогабаритных силовых и импульсных трансформаторов. Аналогичные результаты по магнитной проницаемости можно получить, добавляя к железу кремний (9,5 %) и алюминий (5,6%). Такие сплавы называют альсиферами.

Практически отсутствуют потери на вихревые токи в ферритах. Широко используют ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса

Магнитомягкие материалы изготовляют отжигом: нагревом и выдержкой при температуре около 1000 °С, с последующим медленным охлаждением до комнатной температуры. Для сердечников трансформаторов разработаны кремнистые стали, величина μ которых возрастает с увеличением содержания кремния. Для пермаллоев (сплавы никеля с железом) характерна узкая и почти прямоугольная петля гистерезиса. Особенно высокими значениями магнитной проницаемости μ при малых значениях H отличаются сплавы гиперник (50% Ni, 50% Fe), тогда как в перминваре (45% Ni, 30% Fe, 25% Co) величина μ практически постоянна в широких пределах изменения напряженности поля. Среди современных магнитных материалов следует упомянуть супермаллой – сплав с наивысшей магнитной проницаемостью состав (79% Ni, 16% Fe и 5% Mo).

Магнитные характеристики наноматериалов очень сильно отличаются в сравнении с крупнозернистыми аналогами. Например, с

уменьшением размера зерна коэрцитивная сила сначала возрастает, достигая максимальных значений при диаметре частиц примерно 10 нм. Затем отмечается сильное падение этой магнитной характеристики, которая стремится к нулю. Обнаружены также значительные размерные зависимости намагниченности насыщения и температуры Кюри от размера частиц в наноматериале. Сейчас нет единого мнения о причинах необычных характеристик ферромагнитных материалов, однако создание новых высокоэффективных наноферромагнитов можно считать перспективным.

В настоящее время предъявляются новые требования к магнитным материалам. Это обусловлено миниатюризацией электронных устройств, необходимостью разработки запоминающих и логических элементов большой емкости и быстродействия при малом весе. Некоторые магнитные материалы со специальными свойствами можно создать на основе редкоземельных материалов.

Ниже приведены нормативные документы, касающиеся магнитных материалов.

2.8.4. Стандартные методы испытаний магнитных материалов

ГОСТ 12635 распространяется на высокочастотные магнитомягкие материалы - магнитодиэлектрики (на основе карбонильного железа и альсиферов) и ферриты и устанавливает методы определения их магнитных характеристик при намагничивании переменным периодическим магнитным полем в диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц. Стандарт не устанавливает методов испытаний ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса, а также методов испытаний в импульсном режиме.

ГОСТ 12636 распространяется на высокочастотные магнитомягкие материалы, применяемые в радиоэлектронике: магнитодиэлектрики (на основе карбонильного железа и альсиферов) и ферриты, и устанавливает

методы их испытаний. Стандарт не устанавливает методов испытаний ферритов, применяемых в диапазоне СВЧ, и ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса.

Стандарт регламентирует следующие методы испытаний магнитомягких материалов в диапазоне частот от 1 до 200 МГц, в слабых магнитных полях с напряженностью, равной или менее 0,1 коэрцитивной силы: мостовой метод, резонансный метод

ГОСТ 12637 распространяется на высокочастотные магнитомягкие материалы и устанавливает методы определения их магнитных и диэлектрических характеристик в синусоидальных электромагнитных полях с напряженностью магнитного поля не более 0,1 коэрцитивной силы в диапазоне частот от 200 до 2000 МГц. Стандарт устанавливает два метода определения магнитных и диэлектрических характеристик материалов.

ГОСТ 13610 распространяется на карбонильное радиотехническое железо, изготовленное в виде порошка с частицами сферической формы слоистой структуры, предназначенное для изготовления сердечников катушек индуктивности.

ГОСТ 17809 распространяется на литые магнитотвердые сплавы на железо-никель-алюминиевой основе, предназначенные для изготовления постоянных магнитов.

ГОСТ 21559 распространяется на магнитотвердые спеченные материалы на основе сплавов кобальта с редкоземельными металлами, предназначенные для изготовления постоянных магнитов.

ГОСТ 24063 устанавливает марки, химический состав и параметры магнитотвердых гексаферритов, являющихся материалом постоянных магнитов, используемых для создания магнитных полей в устройствах различного назначения.

ГОСТ 24897 распространяется на магнитотвердые деформируемые материалы на основе сплавов железа, хрома и кобальта, подвергающиеся

горячей и холодной пластической деформации и предназначенные для изготовления постоянных магнитов толщиной не более 50 мм и диаметром не более 100 мм.

ГОСТ 24936 распространяется на постоянные магниты, являющиеся составными частями электротехнических изделий и изготавливаемые в виде деталей или сборочных единиц.

ГОСТ 52956 распространяется на промышленные спеченные магнитотвердые материалы на основе сплавов неодим – железо -- бор (Nd – Fe -- В) и устанавливает номенклатуру марок материалов, включающую как наиболее применяемые, так и недавно разработанные перспективные материалы.

Список литературы

1. Бальшин М. Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. – М.: Металлургия, 1972. - 336 с.
2. Бартенев С.С., Федько, Ю.П., Григоров А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. - Л.: Машиностроение, 1982. - 215 с.
3. Воронин С.В., Юшин В.Д., Бунова Г.З. Физические свойства металлов. Конспект лекций. Ч.1. Учебное пособие. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 44 с.
4. Воронин С.В. Физические свойства металлов. Конспект лекций. Ч. 2. Учебное пособие. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 40 с.
5. Грызунов В.И., Грызунова Т.И. Физические свойства материалов. Учебное пособие. - М.: ФЛИНТА, 2015. - 248 с.
6. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов.- М. Металлургия, 1980. - 320 с.
7. Нарва В.К. Технология и свойства порошковых материалов и изделий из них: Конструкционные материалы. Учебное пособие. - М.: МИСИС, 2010. – 63 с.

8. Панов В.С., Лопатин В.Ю. Составы, технология и свойства порошковых материалов для ядерной техники. Учебное пособие. - М.: МИСиС, 2008. - 105 с.
9. Плаченков Т.Г., Каросенцев С.Д. Порометрия. – Л.: Химия, 1988. – 311 с.
10. Райков С.В., Ващук Е.С. Влияние технологических факторов на свойства металлов и сплавов. Учебное пособие. — Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2014. - 206 с.
11. Рыжонков Д.И., Левина В.В., Дзидзигури Э.Л. Наноматериалы. Учебное пособие. - М.: БИНОМ, 2008. - 365 с.
12. Тумилович М.В., Пилиневич Л.П., Савич В.В., Сморгыо О.Л. Пористые порошковые материалы и изделия на их основе для защиты здоровья человека и охраны окружающей среды: получение, свойства, применение. - Минск: Белорусская наука, 2010. - 367 с.
13. Тушинский Л. И., Плохов А. В., Синдеев В. И. Защитные свойства поверхностных слоев после высокоэнергетических воздействий. Учебное пособие. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, --198 с.
14. Черемской П.Г. Методы исследования пористости твёрдых тел. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 314 с.
15. Kaufman J.G., Sikorsky P.J., Crosby S.R., Sizek H.W. Electrical and Magnetic Properties of Metals Novelty. - ASM International, 2000. - 285 p.
16. Russell A.M., Lee K.L. Structure-Property Relations in Nonferrous Metals. - John Wiley & Sons, Inc., 2005. - 499 p.
17. Schweitzer P.A. Metallic Materials: Physical, Mechanical, and Corrosion Properties. -- New York: Marcel Dekker, 2003. - 702 p.

Глава 3. Механические свойства при статических и динамических испытаниях материалов

Механические свойства - характеристики поведения твердых материалов под действием механических напряжений. Большинство механических свойств являются структурно-чувствительными характеристиками, они также зависят от температуры испытаний, скорости нагружения, влияния окружающей атмосферы, формы и размеров образцов. Механические испытания классифицируют по нескольким принципам: по схеме напряженного и деформированного состояния (восемь схем), способу нагружения (два варианта), по характеру изменения нагрузки во времени (три схемы). Последняя классификация используется чаще предыдущих. По ней различают статические, динамические и циклические испытания. Отдельно выделяют специальные высокотемпературные испытания на ползучесть, длительную прочность, релаксацию напряжений.

При *статических испытаниях* величина и направление нагрузки не зависят от времени или изменяются очень медленно. К статическим относят испытания на растяжение, сжатие, изгиб, кручение, большинство измерений твердости. При *динамических испытаниях* нагрузка изменяется очень быстро, а время деформации и разрушения не превышает сотых долей секунды. Динамическими являются испытания на изгиб образцов с надрезом. *Циклические* (усталостные) испытания характеризуются периодически изменяющимися во времени деформациями и напряжениями. Продолжительность таких испытаний—от сотен до тысяч часов.

3.1. Упругость.

3.1.1. Понятия и определения

Упругость – свойство материала сопротивляться изменению объема или формы под воздействием механических напряжений, обусловленное

возрастанием внутренней энергии. Характеристикой сопротивления материала упругой деформации является модуль упругости. В зависимости от схемы нагружения различают модули упругости при всестороннем сжатии (модуль объёмной упругости), при сдвиге (модуль сдвига), при растяжении (модуль упругости или модуль Юнга). Модуль Юнга и модуль сдвига связаны друг с другом через коэффициент Пуассона.

Основной характеристикой является модуль Юнга, определяющий сопротивление материала деформации и численно равный отношению приращения напряжения к соответствующему приращению упругой деформации. Модуль Юнга (E) применяется в инженерных расчётах на жесткость, устойчивость, прочность, а также во многих разделах физики металлов. Модуль Юнга металлов можно рассматривать двояко. С одной стороны, это физическая упругая постоянная, являющаяся мерой сил межатомной связи. С другой – механическая характеристика, определяющая сопротивление металла нагрузке до предела упругости по диаграмме растяжения. Несмотря на значительные различия в химическом составе конструкционных, инструментальных, со специальными свойствами сталей, модули их упругости различаются не более чем на 10 %.

В инженерных расчетах конструкций E обычно считают структурно нечувствительной характеристикой. Модуль Юнга металлов слабо зависит от термической обработки, легирования и пластическая деформация также не оказывают на него заметного влияния. Образование частиц второй фазы при упрочнении металлов обычно сопровождается незначительным ростом модуля упругости. Аномальными упругими свойствами обладают материалы, имеющие ярко выраженную анизотропию или текстуру.

При нагреве металлов происходит падение E , причем между температурными коэффициентами модуля Юнга и линейного расширения наблюдается прямая зависимость. Это связано с увеличением расстояния

между атомами в кристаллической решетке, вызванным ростом температуры, а, следовательно, с уменьшением сил межатомного взаимодействия.

Методы определения характеристик упругости делят на две группы: статические и динамические. В первую входят испытания на растяжение, изгиб и сжатие. Записывают соответствующие диаграммы и по их начальному прямолинейному участку вычисляют модули упругости. В основе динамических методов лежит зависимость частоты собственных колебаний от модуля упругости испытываемого материала.

У кристаллических материалов до точки, соответствующей пределу пропорциональности, деформация пропорциональна напряжению, а тангенс угла наклона прямолинейного участка кривой растяжения характеризует упругость. Модуль Юнга при этом является мерой сил межатомного взаимодействия. При дальнейшем нагружении металлических образцов отмечается отклонение от закона Гука: металл течёт.

Модуль Юнга чистого железа является константой, определяется исключительно силами межатомного взаимодействия и равен $2,0 \times 10^5$ МПа. Модуль упругости порошковых материалов на основе железа зависит от технологии изготовления и меняется в диапазоне $(0,5-1,0) \cdot 10^5$ МПа, т.е. различается в 2 раза. Модуль упругости зависит также от схемы нагружения. Как правило, при сжатии он на 5–10 % выше, чем при растяжении.

По сравнению с металлами и сплавами иная картина наблюдается у порошковых аналогов, модуль упругости которых зависит не только от температуры испытаний, но и от способа получения изделия, технологических режимов, пористости и т. д. Поэтому для конкретного порошкового материала меру жесткости нужно находить экспериментально. Попытки установить количественную корреляцию между пористостью и модулем упругости не имели успеха.

3.1.2. Определение модуля упругости при изгибе

Типичное хрупкое разрушение характерно для высокопрочных керамических материалов (рис. 3.1) (кривая 1). Иначе ведут себя аналогичные по химическому составу пористые порошковые материалы (кривая 2).

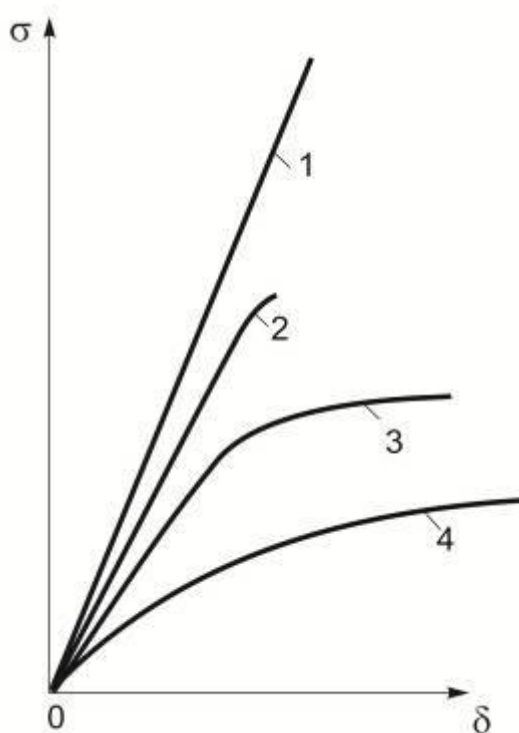


Рисунок 3.1 – Диаграммы "изгибающее напряжение – деформация" некоторых материалов: 1 – хрупкого высокопрочного неметаллического; 2— аналогичному ему по химическому составу порошкового; 3 – металлического порошкового средней прочности; 4 -- металлического порошкового низкопрочного.

Начальный прямолинейный участок у металлических порошковых материалов может быть небольшим (кривая 3) или практически отсутствовать (кривая 4). Это объясняется иным по сравнению с цельнометаллическими образцами механизмом упругости: не силой межатомных связей материала, а облегченным взаимным проскальзыванием и разворотом частиц порошка, при отсутствии между ними прочных связей.

При изгибе у высокопрочных керамик обычно отсутствует даже незначительная пластическая деформация, а разрушение происходит

внезапно, без признаков течения. Поверхность разрушения перпендикулярна растягивающим напряжениям. Что касается низкопрочных металлических материалов, то упругая деформация имеет место лишь при весьма малых напряжениях, а с ростом нагрузки появляется остаточная деформация.

По сравнению с испытаниями на растяжение, испытания порошковых материалов и керамик на изгиб имеют следующие преимущества: схема нагружения отличается большей мягкостью, что дает возможность корректнее исследовать хрупкие материалы; для образцов не нужны головки, которые трудно изготавливать из неметаллических неорганических материалов. Сущность метода заключается в статическом изгибе испытуемого образца, свободно лежащего на двух опорах (рис. 3.2), и определении искомой величины в диапазоне пропорциональности диаграммы изгиба.

Как правило, применяют образцы в виде прямоугольных параллелепипедов с размерами (L) – 80 мм (длина), (b) – $5 \pm 0,5$ мм (ширина), (h) – $3 \pm 0,2$ мм (толщина). Можно использовать образцы с пропорциональными размерами.

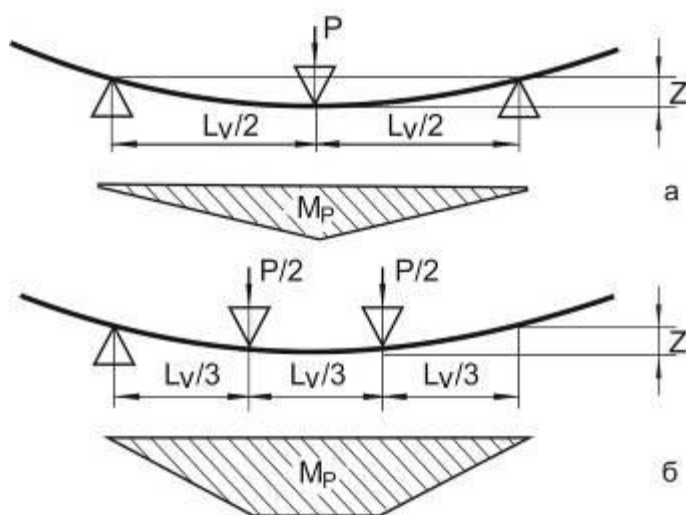


Рисунок 3.2 – Трехточечная (а) и четырехточечная (б) схемы нагружения при изгибе: P – нагрузка; L_v – расстояние между опорами; Z – прогиб; M_p – эпюра момента.

Для оценки упругих характеристик можно использовать положения аттестации керамики. В основе аттестационных испытаний лежит образец в виде параллелепипеда (мм): высота- 3,5, ширина-5,0,длина-50,0. Модуль упругости на таком образце можно определять статическим и динамическим методами.

Испытывают не менее пяти образцов, имеющих идентичную структуру и одинаковую ось анизотропии. Образцы не должны иметь отбитых углов и ребер, а также крупных поверхностных пор. Для повышения точности результатов образцы рекомендуется нормализовать.

Серийно выпускаемые установки не всегда пригодны для корректной оценки упругих свойств на компактных образцах. Однако на базе некоторых из них (установок) созданы экспериментальные комплексы с реконструированными устройствами фиксации усилий и деформаций.

Разработаны автономные установки, состоящие из блока нагружения, обеспечивающего приложение нагрузки к образцу, автономной системы измерений, включающей датчики усилия, прогиба образца и акустической эмиссии. На базе разрывной машины изготовлено оборудование для записи диаграмм деформирования керамики в широком интервале температур (20-1500 °С). Для массовых испытаний созданы высокотемпературные блоки с кассетными устройствами. Они позволяют на воздухе и в нейтральной среде одновременно до необходимой температуры нагревать до 10 образцов и подавать их последовательно на силовые опоры.

Изгибающее усилие при трех точечной схеме нагружения должно быть направлено посередине образца. Если выбрана четырех точечная схема, то образец нагружают двумя роликами. Прогиб оценивают по перемещению подвижной части нагружающего устройства.

Приспособление для трёх точечной схемы нагружения приведено на рис. 3.3. Оно состоит из двух цилиндрических роликов, установленных на определенном расстоянии между собой, и одного нагрузочного. Ролики

диаметром $(3,0 \pm 0,1)$ мм изготавливают из стали, закаленной до твердости не менее 700 HV, или из твёрдого сплава.

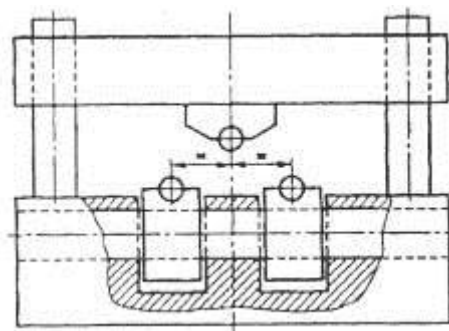


Рисунок 3.3 – Приспособление для определения модуля упругости и предела прочности при поперечном изгибе

В диапазоне пропорциональности кривой изгиба определяют два значения нагрузок и соответствующих им прогибов. Модуль упругости при изгибе ($E_{изг}$), (МПа) для трёх- и четырёх точечной схем нагружения вычисляют соответственно по формулам

$$E_{изг} = \frac{L_v^3(P_2 - P_1)}{4bh^3(Z_2 - Z_1)}; \quad (3.1)$$

$$E_{изг} = \frac{0.185L_v^3(P_2 - P_1)}{bh^3(Z_2 - Z_1)}, \quad (3.2)$$

где P_1, P_2 – нагрузки, МПа; Z_1, Z_2 – прогибы образца, соответствующие нагрузкам P_1 и P_2 , мм.

Схема четырех точечного нагружения, или чистого изгиба дает более надежные результаты испытаний, так как максимальный изгибающий момент возникает при этом на достаточно протяженном участке образца, а не в одном сечении, как при трех точечном сосредоточенном изгибе.

Статические измерения модуля упругости порошковых материалов и керамик имеют, по крайней мере, три недостатка. Во-первых, достаточно трудно изготовить бруски-образцы, особенно шлифовать боковые грани. Во-

вторых, проводить испытания статическими методами весьма сложно из-за высокой хрупкости материала. Незначительная упругая деформация часто завершается разрушением без следов пластической деформации. В - третьих, при высокотемпературных испытаниях на диаграммах деформирования иногда отсутствует явно выраженный предел пропорциональности. Громоздки и сложны системы записи деформаций, требуется большое количество образцов для каждого температурного интервала из-за разброса полученных результатов.

Поэтому модуль упругости в таких сложных условиях измеряют динамическими методами, которые разработаны более детально и имеют меньшие погрешности. Для хрупких материалов характерно совпадение динамического E_d и статического $E_{ст}$ модулей упругости, а для относительно хрупких $E_{ст} < E_d$.

3.1.3. Определение модуля упругости динамическим методом

Стандарты ГОСТ 25095, ASTM C1259, ASTM C1 198 устанавливают методы определения динамического (адиабатического) модуля упругости спеченных твердых материалов. Динамический метод основан на физическом законе зависимости частоты собственных колебаний от модуля упругости испытуемого материала. Оценка динамического модуля упругости заключается в возбуждении ультразвуковых колебаний образца и определении собственной резонансной частоты.

Динамический метод позволяет сравнительно легко определять температурные зависимости модуля упругости на одних и тех же образцах без их разрушения. Достоинством динамического метода является также возможность определения и модуля сдвига.

Применяют стандартные образцы прямоугольного сечения. Для измерений используют прибор, состоящий из крепления для образца, генератора, продольных колебаний с плавной регулировкой частот в

диапазоне от 20 до 100 кГц и частотомера с погрешностью не более 0,2 %. Блок-схема прибора показана на **рис. 3.4**.

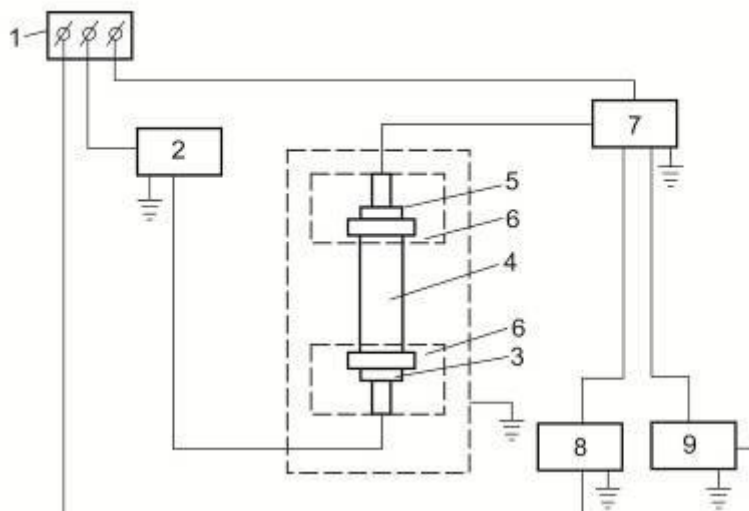


Рис. 3.4 – Прибор для определения модуля Юнга: 1 – стабилизированный источник питания; 2 – генератор ультразвуковых колебаний; 3 – датчик (пьезоэлемент); 4 – образец; 5 – приемник (пьезоэлемент); 6 – экран; 7 – усилитель; 8 – осциллограф; 9 – частотомер

После закрепления образца между двумя пьезоэлементами (датчиком и приемником) частоту генератора повышают до тех пор, пока не будет достигнута самая низкая резонансная частота, соответствующая собственным колебаниям образца. Динамический (адиабатический) модуль упругости (МПа) вычисляют по формуле

$$E = 4 \cdot L^2 \cdot \rho \cdot f^2, \quad (3.3)$$

где L – длина образца, мм; ρ – плотность материала, г/см³; f – частота собственных колебаний, Гц.

3.1.4. Другие методы определения характеристик упругости

С.И. Булычев и В.П. Алёхин показали, что испытания материалов непрерывным вдавливанием индентора позволяют с достаточной точностью определить модуль Юнга. Учитывая простоту измерения микротвёрдости в сравнении с рассмотренными выше методами можно надеяться, что способ

вдавливания индентора для измерения модуля упругости найдёт своё применение в практике неразрушающего контроля.

При наноиндентировании по диаграмме вдавливания после необходимой коррекции можно оценить модуль Юнга покрытия. Согласно Ю. И. Головина используя методику наноиндентирования в исследованиях многослойных композиционных материалов можно измерять микротвёрдость и модуль Юнга отдельно для каждого слоя. Механические свойства некоторых керамик, определённые методом наноиндентирования представлены в таблице. 3.1.

Табл.3.1 - Модули упругости керамик, определённые наноиндентированием

Материал	E , ГПа
Натрийщелочное стекло	70
Керамика на основе Al_2O_3 (горячее прессование, размер зерна 1,2 мкм)	390
Керамика на основе Al_2O_3 (спеченная)	272
Керамика SiC (спеченная)	410
Керамика Si_3N_4 (спеченная)	314
Керамика ZrO_2 (стабилизированная иттрием)	210
Твердосплавная керамика WC - 5 % Co	640

3.2. Прочность, пластичность

Прочность - это способность материала воспринимать нагрузку не разрушаясь. *Прочностные (механические) свойства*—характеристики поведения материала под действием механических напряжений. Большинство прочностных свойств являются структурно-чувствительными, а также зависят от типа, размеров и шероховатости поверхности образцов, температуры испытаний, скорости нагружения и т. д.

3.2.1. Статические испытания на растяжение

Статические испытания на одноосное растяжение – наиболее распространенный вид испытаний для оценки механических свойств металлов и сплавов. Результаты легко анализируются. По результатам одного опыта определяют одновременно несколько важных механических характеристик материала, наиболее часто применяющихся при конструкторских расчетах. Методы регламентированы, как для испытаний материалов, так и испытаний готовых изделий (ГОСТ 1497, ГОСТ 9651, ГОСТ 11150, ГОСТ 11262, ГОСТ 10006 и др.).

В лабораторной работе № 2 «Определение механических свойств материалов при статических испытаниях на растяжение» подробно рассмотрены типовые формы и размеры образцов, основные требования к испытательному оборудованию, методика проведения испытания с использованием измерительного комплекса Instron и подсчета результатов. Ниже приведены лишь основные положения.

Требования к изготовлению образцов, их предельным отклонениям размеров рабочей части, проведению испытания, обработке результатов указаны в ГОСТ 1497. Для испытаний на растяжение используют образцы с рабочей частью в виде цилиндра (цилиндрические образцы) или стержня с прямоугольным сечением (плоские образцы). Помимо основной рабочей части большинство образцов имеет головки различной конфигурации для крепления в захватах испытательной машины. Общие требования к подготовке образцов заключаются в следующем:

- нельзя вырезать образцы из граничных слоев (краев) заготовки;
- образцы вырезают механическим способом, исключая возможность изменения свойств материала вследствие нагрева или наклепа;
- форма и размеры образцов должны быть такими, чтобы не было проскальзывания в захватах, деформации головок и разрушения в местах перехода от рабочей части к головкам;

- шероховатость поверхности рабочей части образцов не должна превышать $Ra\ 1,25\ \mu\text{м}$. Такие образцы получают шлифовкой или чистовым точением.

Конструкции и виды машин, применяемых для испытаний на растяжение, очень разнообразны, однако основные характеристики испытательного оборудования, такие как точность, жесткость, скорость перемещения рабочих органов регламентированы ГОСТ 28840. В настоящее время большинство машин являются компьютеризированными измерительными комплексами и используются для проведения испытаний различного типа, позволяющими проводить расчет различных характеристик в процессе испытания. Особая группа машин – оборудование, предназначенное для испытаний при пониженных и повышенных температурах.

Все многообразие кривых растяжения металлов и сплавов можно свести к обобщенной кривой (рис. 3.5). С точки зрения теории дислокаций на кривой деформации можно выделить несколько стадий.

Первая стадия (упругая деформация). На этой стадии массового движения дислокаций не происходит, а растяжение образца происходит за счет незначительного обратимого смещения атомов. При снятии внешней нагрузки за счет сил притяжения атомы возвращаются в исходное положение и образец приобретает исходную форму и размеры.

Вторая стадия (упруго-пластическая деформация) на которой происходит микропластическая деформация металла. На этой стадии происходит пластическое течение в отдельных зернах, благоприятно ориентированных в направлении касательных напряжений, в зернах низкопрочных фаз. Наиболее интенсивно микропластическая деформация происходит в приповерхностных слоях. Окончание этой стадии увязывают с началом появления линий Чернова-Людерса.

Третья стадия (пластическая деформация) - стадия текучести, при которой начинается множественное скольжение дислокаций с появлением по всей рабочей длине образца полос Чернова–Людерса. В пластичных металлах и сплавах резко повышается плотность дислокаций, формируется дислокационная ячеистая структура, а на поверхности образца образуются микротрещины. Во внутренних объемах металла возникает критическая плотность дислокаций, что сопровождается началом образования шейки. Шейкообразование связано с развитием дисклинационных мод пластической деформации, формированием ячеистой структуры с очень высокой плотностью дислокаций в стенках и зарождением пор на этих стенках. Процесс разрушения завершается разрушением перемычек, разделяющих соседние поры.

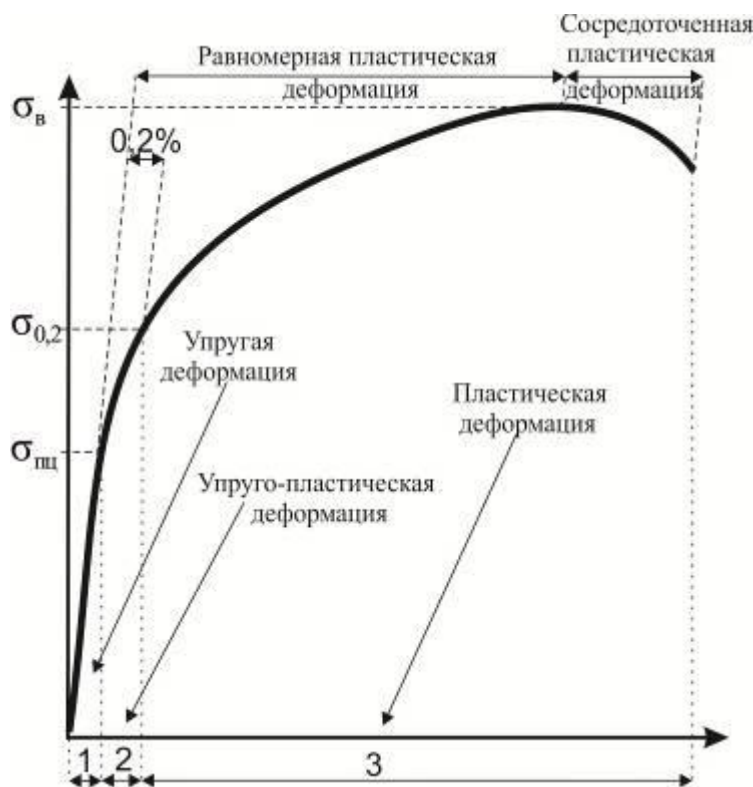


Рис.3.5 – Обобщенная кривая (диаграмма) одноосного растяжения

При испытаниях на растяжение обычно определяют четыре характеристики прочности: предел пропорциональности, условный предел упругости, условный предел текучести (физический предел текучести),

временное сопротивление и две – пластичности: относительное сужение в месте разрушения образца и относительное удлинение.

Предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ – напряжение, которое материал образца выдерживает без отклонения от закона Гука. Условный предел упругости $\sigma_{\text{упр}}$ – напряжение, при котором остаточное удлинение достигает заданной величины, обычно 0,05%. Используемый при расчете допуск указывается в обозначении условного предела упругости: $\sigma_{0,005}$, $\sigma_{0,05}$ и т. д. Предел упругости характеризует напряжение, при котором появляются первые признаки пластической деформации образца

Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ – напряжение, при котором остаточное удлинение достигает заданной величины, обычно 0,2 %. Эта характеристика отличается от условного предела упругости только величиной допуска на остаточную деформацию. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ характеризует напряжение, при котором происходит более полный переход к пластической деформации.

Техническое значение пределов $\sigma_{0,005}$ и $\sigma_{0,2}$ сводится к оценке уровня напряжений, под действием которых та или иная деталь может работать, не подвергаясь остаточной деформации. Физически – это граница между упругим участком, в пределах которого под действием внешнего напряжения движутся дислокации, находившиеся в образце в его исходном состоянии, и между областью пластической деформации, в которой начинают работать источники новых дислокаций.

Зуб текучести и площадка текучести наблюдаются у многих металлических материалов и связаны с различными механизмами закрепления дислокаций, имеющихся в материале перед его деформацией. Например, при эффективной блокировке дислокаций примесями (атмосферы Коттрелла). Тогда для начала движения дислокаций требуется приложить напряжение большее, чем это требуется для перемещения дислокаций, свободных от примесных атмосфер.

Плавный переход от упругой к пластической деформации (без зуба и площадки текучести) наблюдается при растяжении таких металлов и сплавов, в которых имеется достаточно большое количество подвижных, незакрепленных дислокаций в исходном состоянии (до начала испытания). Напряжение, необходимое для начала пластической деформации поликристаллов этих материалов, оцениваемое через условный предел текучести, определяется силами сопротивления движению дислокаций внутри зерен, легкостью передачи деформации через их границы и размером зерен.

Последней (четвертой) характеристикой прочности является временное сопротивление σ_b - напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, выдерживаемой образцом при испытаниях.

Наряду с прочностными характеристиками вычисляют две характеристики пластичности. Относительное сужение в месте разрушения образца $\psi = \Delta F / F_0$ (%) и относительное удлинение $\delta = \Delta l / l_0$ (%). Относительное удлинение, измеряемое в ходе испытаний, обозначают ε , после разрушения образца величина $\Delta l / l_0$ обозначается как δ .

При исследовании наноматериалов многими исследователями было показано, что при измельчении зерна увеличение прочностных характеристик сопровождается некоторым ростом пластичности. Для объяснения таких необычных зависимостей предложено несколько моделей. В основе большинства из них лежит положение о том, что процесс пластической деформации наноматериалов определяется зернограницным скольжением.

Иногда, в качестве дополнительных показателей механических свойств используют полную и удельную работы деформации (рис.3.6). Полная работа деформации w характеризует способность материала поглощать энергию при растяжении и вязкость материала. Она равна площади схематизированной диаграммы растяжения

ОАВСС₂. Удельная работа деформации выражается величиной работы W, необходимой для доведения образца до разрушения (площадь ОАВСС₂), отнесенной к единице его деформируемого объема и рассчитывается по следующей формуле:

$$w = \frac{W}{A_0 l_0}, \quad (3.4)$$

где l_0 – длина рабочей части образца, A_0 – площадь его поперечного сечения. Желательно использовать такие материалы, у которых разрушение происходит после выполнения большой удельной работы деформации. В этом случае процесс разрушения протекает медленно, а излом имеет вязкий характер.

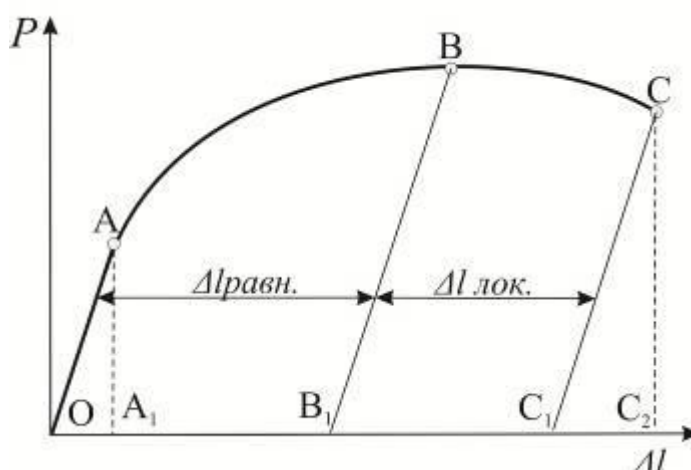


Рис. 3.6 – Определение работы разрушения.

Методы испытания на растяжение черных и цветных металлов при температурах от 10 до минус 100° С устанавливает ГОСТ 11150. Рабочее пространство испытательной машины должно позволять устанавливать криокамеру с удлинительными штангами для крепления образцов. Испытания рекомендуется проводить при температурах + 20, 0, - 20, - 40, - 60, - 80, - 100°С.

3.2.2. Прочность порошковых и керамических материалов

Прочность металлических порошковых материалов находится в диапазоне 15 – 200 МПа, что в 5-10 раз ниже прочности компактного металла. Это объясняется их следующими структурными особенностями:

1. Суммарная площадь участков между частицами, на которых образовалось прочное соединение, составляет только часть всей площади их контакта.

2. Прочность в пятне приваривания ниже прочности компактного материала, что объясняется макро и микроскопической дефектностью образовавшегося соединения.

3. Отсутствуют рекристаллизационные процессы на границах приварившихся частиц.

4. Поры, оксидные включения, трещины и другие дефекты, служат концентраторами напряжений.

Пределы прочности керамик для разных схем нагружения (растяжения, изгиба, сжатия) различны. Так, предел прочности при сжатии в несколько раз выше, чем при растяжении. Отмечен большой разброс результатов при механических испытаниях керамических материалов. Это связано с необходимостью использовать небольшие образцы, трудностью их изготовления, неоднородностью строения, наличием микротрещин, локальной пористостью и т.д. Поэтому для испытаний обычно используют не менее 6-10 образцов. У керамических и порошковых материалов предел прочности есть переменная величина, сильно зависящая от типоразмеров образца. Чем больше размеры образца, тем вероятнее обнаружится в нём критический опасный дефект и тем меньше его прочность.

При растяжении на предел прочности значительно влияет пористость, а при изгибе – анизотропия (положение образца при испытаниях) и пористость. Керамические порошковые материалы являются специфическим объектом для механических испытаний и требуют особых методов исследований в сравнении с монокристаллическими материалами.

Для тонких хрупких керамических образцов по сравнению с массивными образцами и пластичными металлическими объектами возрастает роль отношения поверхности к объему. Увеличивается значение поверхностных дефектов, действующих как концентраторы напряжений. При этом влияние дефектов усиливается с уменьшением толщины.

У образцов малых размеров по сравнению с большими для всех схем нагружения характерно разрушение при меньшей деформации. Причины этого, во-первых, в соизмеримости размеров зерен (частиц) с толщиной образца, во-вторых, в резком уменьшении доли деформации, локализованной в весьма узкой области возле магистральной трещины.

При испытании порошковых материалов и керамик наибольшее распространение получил метод определения прочности при трехточечном изгибе (см. **рис. 3.2 а**). Сущность метода заключается в определении предельной разрушающей нагрузки, приложенной в середине призматического образца, свободно лежащего на опорах и вычислении искомой характеристики.

Машины для измерения прочности (см. **рис. 3.3**) должны обеспечивать: регистрацию небольших усилий и деформаций, надёжную установку и точную центровку образцов, малую скорость нагружения.

Предел прочности при изгибе, МПа, с учетом горизонтальной составляющей изгибающего момента вычисляют по формуле:

$$\sigma_b^n = \frac{3PL_v}{2dh^2} \left(1 + \frac{4Z^2}{L_v^2} \right), \quad (3.5)$$

где Р – максимальная нагрузка, Н.

Интересны попытки некоторых исследователей применить метод акустической эмиссии для изучения кинетики разрушения керамических образцов. При этом появляется возможность пространственно-временной локализации и идентификации нарушения сплошности в объеме при изгибе или

растяжении. Основными информативными параметрами служат амплитуда сигнала (величина, связанная с увеличением линейного размера дефекта) и количество импульсов. С датчика, прижатого к образцу, сигнал акустической эмиссии поступает на предварительный усилитель, а затем на вход прибора акустической эмиссии. Число зарегистрированных импульсов акустической эмиссии пропорционально количеству разрывов начиная с момента образования первых микротрещин и до возникновения магистральной макротрещины.

3.2.3.Сверхпластичность материалов

Сверхпластичность - способность металлов и сплавов к большим равномерным пластическим деформациям без нарушения внутренней сплошности. Различают *структурную (микрозернистую) сверхпластичность* и *сверхпластичность превращения*.

Структурная сверхпластичность проявляется в материалах с ультрамелким зерном-- диаметром от 1 до 10 мкм при температурах выше 0,4 Тпл. Для таких материалов характерны высокое относительное удлинение ($\sim 10^2 \text{ — } 10^3 \%$) и низкое напряжение течения (1-10 МПа). При сверхпластичности действуют три механизма деформации: зернограничное скольжение, внутризеренное скольжение дислокаций и диффузионная ползучесть, причем зернограничное скольжение — главный механизм сверхпластической деформации. Для наноразмерных материалов характерны также очень большие значения сверхпластичности, значительно превышающие величины характерные для микрозернистого состояния.

Сверхпластичность превращения проявляется в металлах и сплавах во время фазового превращения. В отличие от структурной сверхпластичности, проявляющейся только в материалах с ультрамелким зерном, сверхпластичность превращения можно наблюдать в материалах с любым размером зерна и при низких температурах. Природа сверхпластичности превращения связана со значительными изменениями свойств материала при

деформации вблизи температуры фазового превращения, как диффузионного, так и сдвигового мартенситного.

Сверхпластичные материалы используют для изготовления изделий очень сложной формы с особо глубокой вытяжкой.

3.2.4. Статические испытания на сжатие и кручение

В лабораторной работе № 4 «Определение механических свойств материалов при испытаниях на сжатие» **во второй части учебника** подробно рассмотрены типовые формы и размеры образцов, основные требования к испытательному оборудованию, методика проведения испытания и подсчета результатов. Ниже приведены лишь основные положения.

Метод статических испытаний на сжатие для определения характеристик механических свойств черных и цветных металлов и сплавов устанавливает ГОСТ 25.503. Стандарт устанавливает методику испытания для построения кривой упрочнения, определения математической зависимости между напряжением течения и степенью деформации. Механические характеристики, кривая упрочнения и ее параметры, определяемые в стандарте, могут быть использованы в случаях: выбора металлов, сплавов и обоснования конструктивных решений; статистического приемочного контроля, нормирования механических характеристик и оценки качества металла; разработки технологических процессов и проектирования изделий; расчета на прочность деталей машин.

ГОСТ 3565 распространяется на черные и цветные металлы и сплавы, а также на изделия из них и устанавливает методы статических испытаний на кручение при температуре 20°C для определения характеристик механических свойств и характера разрушения при кручении.

По результатам испытания образцов на кручение производят определение следующих механических характеристик: модуля сдвига, предела пропорциональности, предела текучести, предела прочности

(условного), предела прочности (истинного), максимального остаточного сдвига, характера разрушения (срез или отрыв).

Для испытания на кручение может быть использована испытательная машина, которая обеспечивает: свободное кручение образцов без каких-либо дополнительных нагрузок на образец в течение всего процесса испытания; центрирование образца в захватах и плавность статического нагружения.

В качестве основных применяют цилиндрические образцы с диаметром в рабочей части 10 мм и с расчетной длиной 100 и 50 мм, с головками на концах для закрепления в захватах испытательной машины.

3.3. Внутреннее трение

3.3.1. Понятия и определения

Под *внутренним трением* понимают способность твердых тел необратимо поглощать и рассеивать внутрь материала механическую энергию, сообщаемую извне. Внутреннее трение – это неупругое релаксационное свойство, проявляющееся как вязкое сопротивление взаимному перемещению частей одного и того же твердого тела при его деформировании или при сообщении ему механических колебаний. Демпфирование – способность материала необратимо гасить механические колебания. Материалы с наноструктурой могут сочетать повышенные демпфирующие и прочностные свойства, тогда как в их крупнозернистых аналогах рост демпфирующей способности сопровождается падением прочности.

Определение величины внутреннего трения позволяет выбирать демпфирующие материалы для гашения механических колебаний (здесь необходимо высокое внутреннее трение) или рекомендовать сплавы, практически не рассеивающие упругую энергию, т.е. обладающие незначительным внутренним трением. Кроме того, измерение внутреннего трения дает информацию о механизмах фазовых превращений, диффузии,

кинетики выделения избыточных фаз. Методика внутреннего трения может быть использована для оценки работоспособности материалов в условиях их длительной работы при сложных температурных и силовых воздействиях.

Что касается материалов с покрытиями, то особый интерес данная методика вызывает потому, что дает возможность изучать поверхностные дислокационные изменения структуры материала при механическом нагружении, которые в настоящее время исследовать иными способами на таких объектах не представляется возможным. Характеристики внутреннего трения определяют при малых и больших амплитудах и соответственно называют амплитудно-независимыми и амплитудно-зависимыми из-за двух механизмов рассеивания, действующих в областях различных по величине амплитуд (рис. 3.7).

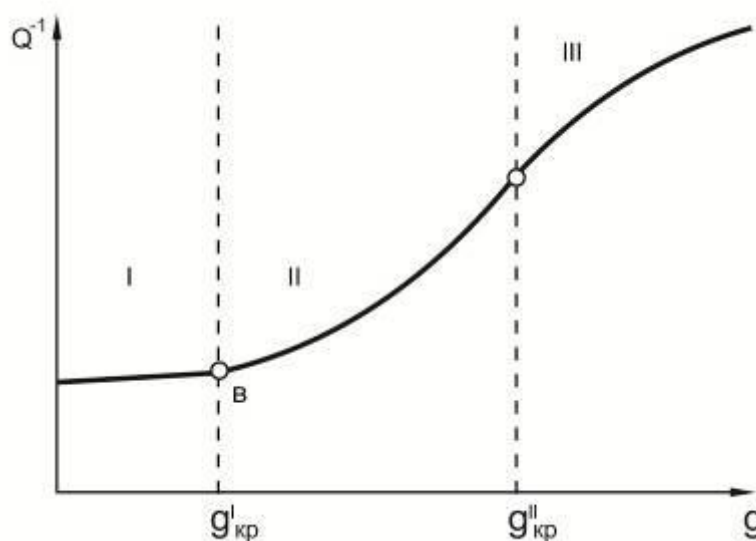


Рис. 3.7 – Зависимость внутреннего трения Q^{-1} от амплитуды деформации g : I – область амплитудно-независимого внутреннего трения; II – область начала амплитудной зависимости; III – область значительной амплитудной зависимости внутреннего трения

В области I образец деформируется в соответствии с законом Гука. Для нее характерна зависимость внутреннего трения от частоты нагружения, температуры, химического состава, и в то же время внутреннее трение не

является функцией амплитуды колебаний. При увеличении уровня деформаций наблюдается амплитудная зависимость внутреннего трения (АЗВТ) – области II и III.

Оценочной характеристикой внутреннего трения (Q^{-1}) служит величина потери энергии колебаний за один цикл, отнесенная к полной энергии, полученной образцом

$$Q^{-1} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W}, \quad (3.6)$$

где ΔW – величина потерь энергии колебаний за один цикл; W – полная энергия деформации.

Другим критерием внутреннего трения является логарифмический декремент затухания амплитуды колебаний, равный натуральному логарифму отношения предыдущего максимального отклонения колеблющегося образца к последующему:

$$Q^{-1} = \frac{1}{2\pi} \frac{\ln(A_0 / A_n)}{n}, \quad (3.7)$$

где A_0 – начальная амплитуда колебаний;

A_n – конечная амплитуда колебаний;

n – число колебаний, которое укладывается в интервале амплитуд A_0 – A_n .

Ход кривой выше точки b (см. рис. 3.7), т.е. в области АЗВТ определяется взаимодействием дислокаций с точечными дефектами.

3.3.2. Дислокационная модель Гранато-Люкке

Для объяснения эффекта рассеяния энергии А. Гранато и Г. Люкке предложили модель перемещения дислокационной линии под действием напряжения (рис. 3.8).

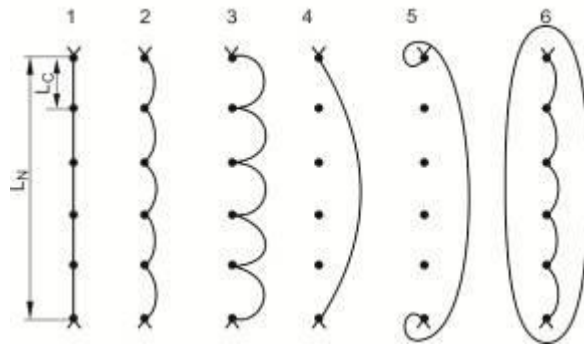


Рис. 3.8 – Дислокационная модель внутреннего трения Гранато-Люкке.

В первоначальном положении (до деформации) дислокации распределены в металле сравнительно равномерно, образуя сетку дислокаций. L_N – длина дислокации, ограниченная с обеих сторон точками пересечения с другими дислокациями (положение 1). Вместе с тем примесные атомы, находящиеся в металле, при достаточной концентрации могут блокировать дислокацию в нескольких точках, разделяя ее на отрезки L_C . На начальных этапах нагружения (положения 2, 3) участки дислокации выгибаются с увеличением кривизны по мере роста напряжения. При напряжении отрыва происходит разблокировка дислокации примесными атомами (положение 4), при этом рост деформации не сопровождается увеличением напряжения. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к функционированию известного источника Франка-Рида (положения 5, 6).

Амплитудную зависимость внутреннего трения можно объяснить по рассмотренной модели. Разблокировка дислокации от примесных атомов вызывает появление амплитудной зависимости декремента, что происходит при определенной критической амплитуде. Появление дислокационной петли от работающего источника Франка-Рида обуславливает образование второй критической амплитуды. Следовательно, измеряемые характеристики АЗВТ прямо связаны с параметрами дислокационной структуры: энергией связи дислокационной линии с точечными дефектами и узлами дислокационной сетки, длиной отрезков, сегментов и плотностью дислокаций.

Применяя модель Гранато и Люкке и используя кривые АЗВТ, можно определить важные параметры дислокационной структуры материала. Наряду с L_N и L_C вычисляют: критическую деформацию, соответствующую напряжению разблокировки линии дислокации примесными атомами; критическую деформацию, соответствующую напряжению, вызывающему размножение дислокаций по механизму Франка-Рида; плотность дислокаций.

Для исследований внутреннего трения материалов обычно используют метод крутильного маятника, причем образец выполняет роль упругой части маятника. В конструкции установки (рис. 3.9) образец толщиной 0,5-1,0 мм жестко соединен в верхней части с подвесом, изготовленным из материала с малой инерционностью и служащим для поддержания в вертикальном положении образца и инерционной массы. Нижний конец образца закреплен неподвижно. Инерционная масса предназначена для снижения частоты колебаний крутильного маятника. При испытаниях образец при помощи специальной возбуждающей системы закручивается на определенный угол. Регистрирующая оптическая система позволяет определить первоначальную A_0 и конечную A_n амплитуды n -го колебания.

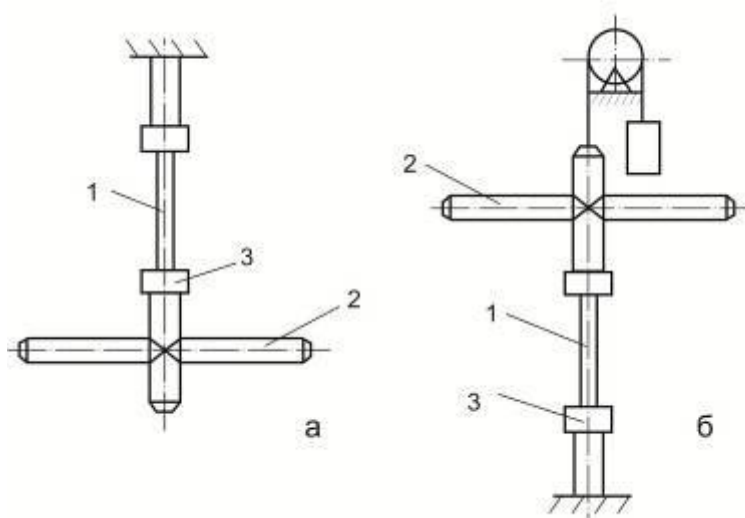


Рис. 3.9 – Схема прямого (а) и перевернутого (б) крутильных маятников: 1 – образец; 2 – инерционная масса; 3 – захваты

Применяемые в настоящее время установки представляют собой сложные приборы, позволяющие также определять и некоторые механические свойства материалов, например модуль упругости, с точностью до 0,01 %.

3.4. Твердость

3.4.1. Понятия и определения

Твердостью называют сопротивление материала местной деформации или разрушению при внедрении в него более твердого тела – индентора, который в зависимости от метода измерения имеет форму шарика, конуса или пирамиды. По величине получаемого на поверхности отпечатка или глубине внедрения индентора можно сделать вывод о твердости исследуемого материала. Твердость материала, отражает целый комплекс его механических свойств.

Из всех существующих методов оценки механических свойств материалов определение твердости является наиболее распространенным вследствие простоты и доступности метода, высокой производительности и возможности выполнения измерений непосредственно на проверяемых деталях и полуфабрикатах. В ходе испытаний изделия не разрушаются, оставленные на них отпечатки могут быть легко удалены, поэтому метод может быть использован для сплошного контроля качества продукции. Способ замера твердости не требует изготовления специальных образцов; для испытания на твердость достаточно подготовить небольшой участок гладкой поверхности абразивным кругом или шлифовальной бумагой.

Получаемые в результате испытаний числовые значения чаще всего используют для контроля качества термической обработки материала или выбора наиболее рационального технологического режима. Поверхностно упрочненные материалы испытывают на твердость для контроля качества нанесенного слоя, выявления изменений в поверхностных участках

основного металла, оценки структурной неоднородности по сечению покрытия, для исследования закономерностей изнашивания, и т.д.

Однако, твердость является недостаточно определенным понятием, чем и объясняется наличие большого количества различных методов и приборов для ее определения. Отсутствие теоретических зависимостей величин твердости от физических свойств материалов не позволяет установить связь единиц твердости с основными единицами Международной системы (СИ).

В зависимости от скорости вдавливания индентора в материал все методы измерения твердости можно подразделить на:

- статические, при которых вдавливание индентора в поверхность происходит с низкой скоростью;
- динамические, при которых индентор действует на образец с определенной кинетической энергией, затрачиваемой на формирование отпечатка и/или упругую отдачу;
- кинетические, при которых происходит непрерывная регистрация процесса вдавливания индентора с записью диаграммы «нагрузка на индентор – глубина его внедрения».

При определении твердости всеми методами (кроме микротвердости) измеряют интегральное значение твердости материала (усредненное для всех структурных составляющих). Поэтому отпечаток, получающийся после снятия нагрузки, должен быть по размеру существенно больше размеров структурных составляющих тестируемого материала. Наиболее распространены методы определения твердости металлов при статических нагрузках, т.е. нагрузках, которые прилагаются плавно и постепенно. Это методы Бринелля, Роквелла и Виккерса, основанные на статическом вдавливании стандартных наконечников в виде стального закаленного шарика, алмазного конуса и алмазной пирамиды. Каждый из указанных

методов позволяет определить твердость материалов определенного вида или метода обработки.

3.4.2.Измерение твердости по Бринеллю

Измерение твердости *методом Бринелля* установлено требованиями ГОСТ 9012 (ИСО 410, ИСО 6506).

Сущность метода заключается во вдавливании стального или твердосплавного шарика в образец (изделие) под действием усилия, приложенного перпендикулярно к поверхности образца, в течение определенного времени, и последующим измерении диаметра полученного отпечатка после снятия усилия (рис. 3.10). Время действия нагрузки и ее величина регламентируются, причем отношение нагрузки к квадрату диаметра шарика должно быть постоянным. Твердость определяют по диаметру отпечатка, оставшегося на поверхности образца после снятия нагрузки. Диаметр отпечатка измеряют с помощью микроскопа, лупы Бринелля или других средств измерения. Измерение диаметра проводят с точностью до 0,05 мм в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для определения твердости принимают среднее значение полученных величин. Число твердости по Бринеллю определяют по таблицам в зависимости от диаметра отпечатка, радиуса индентора и величины приложенной нагрузки. В связи с тем, что площадь отпечатка должна быть значительной, метод измерения твердости по Бринеллю применяют для металлов с твердостью менее 4500 МПа. В противном случае стальной шарик может деформироваться или разрушиться. Таким методом определяют твердость сталей после отжига или нормализации, бронз, латуней и т.д.

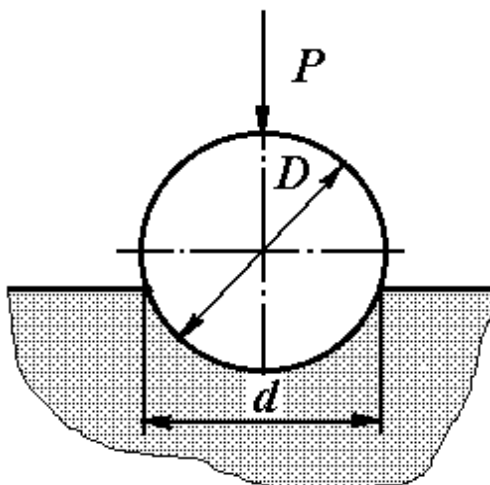


Рис. 3.10 – Схема измерения твердости по Бринеллю

Число твердости по Бринеллю, представляет собой отношение нагрузки P к площади поверхности сферического отпечатка F и измеряется в $\text{кгс}/\text{мм}^2$ или МПа. Площадь отпечатка в значительной степени зависит от диаметра вдавливаемого шарика, поэтому твердость по Бринеллю рассчитывают по следующей формуле:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (3.8)$$

где P – нагрузка на шарик (кгс), D – диаметр шарика, (мм); d – диаметр отпечатка. Для перевода твердости по Бринеллю в единицы СИ необходимо умножить полученное значение на 9,81:

$$HB (\text{кгс}/\text{мм}^2) = 9,81 \times HB (\text{МПа}).$$

Обычно при определении твердости вычисления по вышеуказанной формуле не производят, а используют таблицы приложения ГОСТ 9012, составленные для установленных диаметров шариков, и нагрузок и диаметров полученных отпечатков.

В качестве индентора используют шарики диаметром 10,0; 5,0; 2,5; 2,0; 1,0 мм. Значение коэффициента K , который устанавливает соотношение между нагрузкой и квадратом диаметра шарика, выбирают в зависимости от

металла, его твердости (табл. 3.1). Диаметр шарика и нагрузку выбирают в соответствии с твердостью исследуемого материала. При этом для получения одинаковых чисел твердости одного материала при испытании шариками разных диаметров необходимо соблюдать закон подобия между получаемыми диаметрами отпечатков. Поэтому твердость измеряют при постоянном соотношении между величиной нагрузки P и квадратом диаметра шарика D^2 .

Твердость по Бринеллю обозначают символом НВ, которому предшествует числовое значение твердости из трех значений цифр. После символа указывают диаметр шарика, значение приложенного усилия (в кгс), продолжительность выдержки, если она отличается от 10 до 15 с.

Табл. 3.2 - Выбор параметров испытаний для материалов с различной твердостью

Вид материала	Твердость НВ, кгс/мм ²	Соотношение между P и D^2	Коэффициент K	Диаметр шарика D , мм	Нагрузка P , кгс	Время выдержки под нагрузкой, с
Черные и цветные металлы и сплавы	140 и более	$P = 30D^2$	30	10	3000	10
				5	750	
				2,5	187,5	
Черные металлы	менее 140	$P = 10D^2$	10	10	1000	10
				5	250	
				2,5	62,5	
Титановые сплавы	50 и более	$P = 15D^2$	15	10	1500	30
Медные	35 и	$P = 10D^2$	10	10	1000	30

сплавы	более			5	250	
				2,5	62,5	
Цветные сплавы	менее 35	$P = 5D^2$	5	10	500	120
				5	125	
				2,5	31,2	

Например, в записи 250 НВ 5/520/30 250 означает число твердости, 5 – диаметр шарика (мм), 520 - величина нагрузки (кгс), 30 – длительность выдержки (с). Если испытания проводят по типовым режимам ($D = 10$ мм, $P = 3000$ кгс), режимы в обозначении не указывают, а записывают только число твердости. Например, 250 НВ, где 250 – число твердости по Бринеллю.

Твердость по Бринеллю измеряют на стационарных приборах с механическим нагружением или переносных приборах, предназначенных для определения твердости крупногабаритных деталей на месте их нахождения. Подробно схема работы стационарного твердомера ТШ и последовательность измерения твердости описаны в лабораторном практикуме во второй части учебника.

При измерении твердости по методу Бринелля необходимо выполнять следующие условия:

- не испытывать образцы с твердостью выше НВ 450 кгс/мм² (4500 МПа), так как это приведет к деформации или разрушению стального индентора (шарика);
- диаметры полученных отпечатков d должны находиться в пределах 0,2-0,6 диаметра индентора;
- образцы должны иметь толщину не менее 10-кратной глубины отпечатка (или менее диаметра шарика);
- расстояние между центром отпечатка и краем образца должно быть не менее 2,5 диаметров отпечатка; расстояние между центрами двух смежных отпечатков должно быть не менее четырех диаметров отпечатка; для

металлов с твердостью до 35 НВ эти расстояния должны быть соответственно 3 и 6.

3.4.3.Измерение твердости по Роквеллу

Из-за простоты и оперативности измерений метод определения твердости по Роквеллу является одним из самых распространенных. *Твердость по Роквеллу* выражается в условных единицах и отсчитывается по шкале индикатора непосредственно в процессе испытания. Методы отбора образцов, аппаратуры и проведение испытаний регламентирует ГОСТ 9013 (ИСО 6508). Стандарт устанавливает метод измерения твердости по шкалам А, В, С, D, Е, F, G, Н, К. Сущность метода заключается во внедрении в поверхность образца (или изделия) алмазного конусного (шкалы А, С, D) или стального сферического наконечника (шкалы В, Е, F, G, Н, К) под действием последовательно прилагаемых усилий предварительного F_0 и основного F_1 усилий и в определении глубины внедрения наконечника после снятия основного усилия (F_1) (Рис. 3.11, 3.12). При этом толщина образца (или изделия) должна не менее чем в 10 раз превышать глубину внедрения наконечника после снятия основного усилия.

Приборы для измерения твердости должны обеспечивать приложение усилий, приведенных в табл. Возможно применение двух инденторов: наконечника алмазного конусного с углом при вершине - 120° и радиусом сферической части 0,2 мм (шкалы А и С); и наконечника со стальным закаленным шариком. Номинальные диаметры шариков должны быть 1,588 мм (шкалы В, F, G) и 3,175 мм (шкалы Е, Н, К).

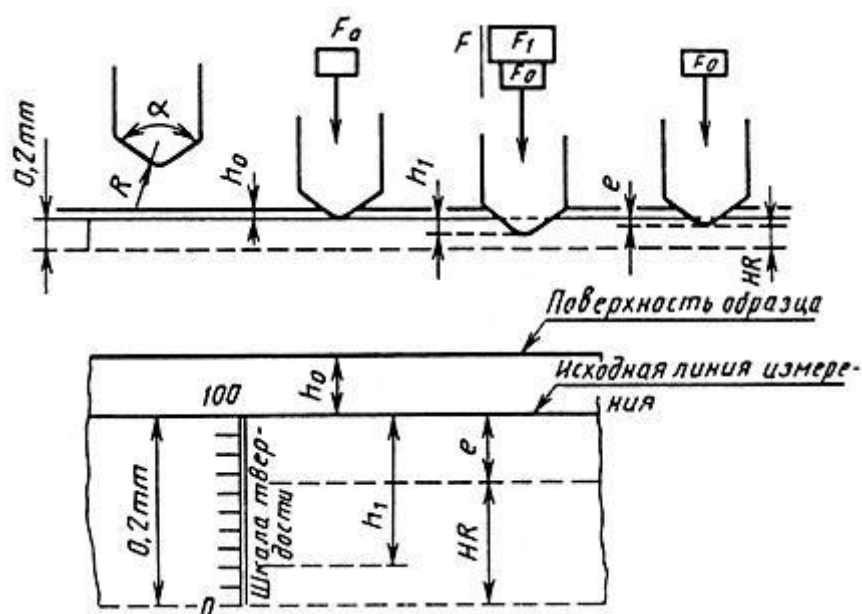


Рис. 3.11 – Схема измерения твердости по Роквеллу при применении алмазного наконечника по шкале А и С: α - угол при вершине алмазного конусного наконечника, F_0 - предварительное усилие, F_1 - основное усилие, h_0 - глубина внедрения наконечника под действием предварительного усилия, h_1 - глубина внедрения наконечника под действием основного усилия, e - глубина внедрения наконечника после снятия основного усилия.

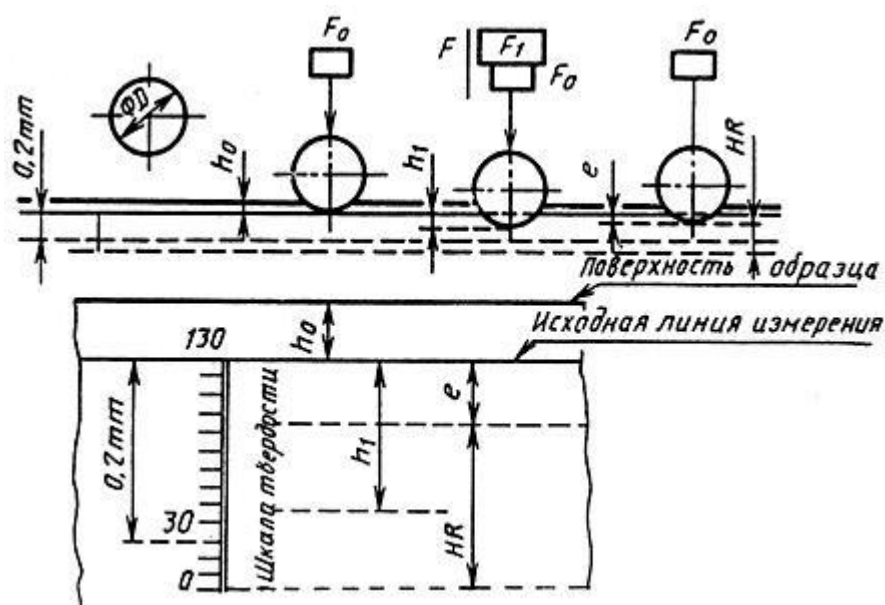


Рис. 3.12 – Схема измерения твердости по Роквеллу по шкале В.

Табл.3.3 - Шкалы твердости по Роквеллу и приложенные усилия.

Шкала твердости	Обозначение единицы измерения	Предварительное усилие F_0	Основное усилие F_1	Общее усилие F	Диапазон измерений, ед. твердости
		Н (кгс)			
A	HRA	98,07(10)	490,3(50)	588,4(60)	20-88
B	HRB	98,07(10)	882,6(90)	980,7(100)	20-100
C	HRC	98,07(10)	1373(140)	1471(150)	20-70
D	HRD	98,07(10)	882,6(90)	980,7(100)	40-77
E	HRE	98,07(10)	882,6(90)	980,7(100)	70-100
F	HRF	98,07(10)	490,3(50)	588,4(60)	60-100
G	HRG	98,07(10)	1373(140)	1471(150)	30-94
H	HRH	98,07(10)	490,3(50)	588,4(60)	80-100
K	HRK	98,07(10)	1373(140)	1471(150)	40-100

Твердость по Роквеллу HR вычисляют по следующей формуле:

$$HR = \frac{k - (h - h_0)}{C}, \quad (3.9)$$

где h_0 – глубина внедрения наконечника под действием предварительной нагрузки, мм; h – глубина внедрения наконечника под действием общей нагрузки, мм; k – постоянная величина, равная 0,26 мм для шарика и 0,2 мм для алмазного конуса; C – цена деления шкалы индикаторного прибора, соответствующая внедрению наконечника на 0,002 мм.

Число твердости по Роквеллу определяют по шкале индикатора или показателя цифрового отчетного устройства с округлением до 0,5 единицы твердости. При измерении твердости на выпуклых цилиндрических и

сферических поверхностях по шкалам А, В, С, D, F, G в результаты измерения твердости должны быть введены поправки, величины которых приведены в приложении ГОСТ 9013. Поправки прибавляют к полученным значениям твердости. Твердость покрытий можно найти только в том случае, если их толщина не менее чем в 10 раз превышает глубину проникновения индентора после снятия основной нагрузки. Подробно последовательность измерения твердости приведена в лабораторном практикуме.

Число твердости по Роквеллу обозначается HR и не имеет размерности. К индексу добавляется обозначение шкалы А, В или С, по которой производилось испытание. Например, 60 HRC – означает твердость по Роквеллу 60 единиц, измеренная по шкале С.

Преимущество метода Роквелла по сравнению с методом Бринелля заключается в том, что значение твердости по методу Роквелла (глубина вдавливания индентора) фиксируется непосредственно в процессе испытаний на индикаторе, при этом отпадает необходимость в оптическом измерении размеров отпечатка. Метод Роквелла является более универсальным, так как позволяет испытывать металлы и сплавы высокой твердости, в том числе твердые сплавы. По методу Роквелла можно также определять твердости относительно тонких образцов (толщиной до 0,4 мм). Однако точность определения твердости по методу Роквелла ниже, чем при использовании метода Бринелля, так как измерение твердости происходит на более локальном участке поверхности, поэтому обычно проводят несколько замеров (не менее трех раз на одном образце) и определяют среднюю величину показателя твердости.

При измерении твердости по методу Роквелла необходимо выполнять следующие условия:

- в процессе нагружения не должно быть перемещения (качания) образца;
- поверхность образца должна быть плоской и очищенной от окалины и других посторонних веществ, желательна шлифовка поверхности;

- необходимо контролировать перпендикулярность приложения нагрузки и поверхности образца;
- расстояние между центрами двух соседних отпечатков должно быть не менее четырех диаметров отпечатка (но не менее 2 мм). Расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее 2,5 диаметра отпечатка (но не менее 1 мм).

3.4.4. Измерение твердости по Виккерсу

По схеме нагружения *метод Виккерса* (ГОСТ Р ИСО 6507) напоминает измерение твердости по Бринеллю, только в качестве индентора используют четырехгранную алмазную пирамиду с углом между противоположными гранями 136° (2,38 рад).

Измерение твердости основано на вдавливании алмазного наконечника в форме правильной четырехгранной пирамиды в образец (изделие) под действием нагрузки F , приложенной в течение определенного времени, и измерении диагоналей отпечатка, оставшихся на поверхности образца после снятия нагрузки. Минимальная толщина образца должна быть для стальных изделий больше диагонали отпечатка в 1,2 раза; для изделий из цветных металлов - в 1,5 раза.

Для определения твердости черных металлов и сплавов применяют нагрузки от 49,03 Н (5 кгс) до 980,7 Н (100 кгс); для меди и ее сплавов — от 24,52 Н (2,5 кгс) до 490,3 Н (50 кгс); для алюминиевых сплавов — от 9,807 Н (1 кгс) до 980,7 Н (100 кгс).

Для определения твердости по Виккерсу берут среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей (рис. 3.13).

Твердость по Виккерсу, вычисленная в зависимости от длины диагонали отпечатка при стандартных значениях нагрузки F , приведена в приложении к ГОСТ Р ИСО 6507.

Размерность твердости, определенной по методу Бринелля или Виккерса, одинакова – $\text{кгс}/\text{мм}^2$ (Па). Из всех методов замера твердости

рассматриваемый наиболее совершенен, так как позволяет получать значения твердости практически для любых материалов.

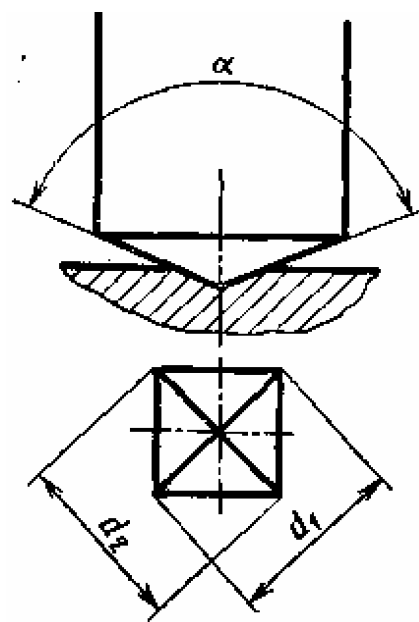


Рис. 3.13 – Схема измерения твердости по Виккерсу

В зависимости от величины нагрузки при измерении твердости по шкалам Виккерса различают три диапазона. Зависимость применяемых шкал Виккерса от величины нагрузки приведена в таблице 3.4. ГОСТ Р ИСО 6507 рекомендует выбирать нагрузки по таблице 3.5.

Табл. 3.4 - Нагрузки и диапазоны шкал твердости по Виккерсу.

Нагрузка F, Н	Диапазоны шкал твердости	Используемые термины
49.03 и более	HV 5 и выше	Твердость по шкале Виккерса
От 1.961 до 49.03	От HV0.2 до HV5	Твердость по шкале Виккерса с малой нагрузкой
От 0.09807 до 1.961	От HV 0.01 до HV 0.2	Микротвердость

Табл. 3.5 - Шкалы твердости и соответствующие им номинальные значения нагрузок

Обозначение шкалы твёрдости	Номинальное значение нагрузки F. Н	Обозначение шкалы твёрдости с малой нагрузкой	Номинальное значение нагрузки F. Н	Обозначение шкалы микро твёрдости	Номинальное значение нагрузки F. Н
HV 5	49.03	HV0.2	1.961	HV0.01	0.09807
HV 10	98.07	HV0.3	2.942	HV 0.015	0.1471
HV20	196.1	HV0.5	4.903	HV 0.02	0.1961
HV 30	294,2	HV 1	9.807	HV 0.025	0.2452
HV 50	490,3	HV 2	19.61	HV 0.05	0.4903
HV 100	980.7	HV 3	29.42	HV0.1	0.9807

3.4.5. Измерение микротвердости

Сущность метода измерения *микротвердости* заключается во вдавливании индентора нагрузкой в диапазоне 0.09807 - 0.9807 Н в поверхность материала (см. табл. 3, правая колонка). После снятия нагрузки измеряют диагональ отпечатка d и рассчитывают показатель твердости как отношение нагрузки P к площади боковой поверхности отпечатка (рис. 3.14). Порядок проведения измерений регламентирован требованиями ГОСТ 9450.

Основное назначение метода - определение сопротивления пластическому и упругому деформированию отдельных частиц, структурных составляющих в гетерофазных материалах и сплавах, нахождение анизотропии твердости различных участков материала, измерение твердости мелких деталей, тонких поверхностных слоев, покрытий и т.д.

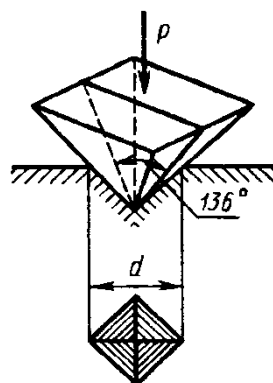


Рис. 3.14 – Схема измерения микротвердости материалов вдавливанием алмазного наконечника (пирамида Виккерса)

Различают два метода испытаний: по восстановленному отпечатку (основной) и не восстановленному (дополнительный). В первом - параметры отпечатка определяют после снятия нагрузки, во втором - вдавливание алмазного наконечника в исследуемую поверхность сопровождается одновременным измерением глубины его отпечатка. Испытания по второй методике проводят, когда требуется получить дополнительные характеристики материала: упругое восстановление, релаксацию, модуль упругости. Второй метод характеризует сопротивление материала пластической и упругой деформациям при вдавливании алмазного наконечника в течение определенного времени.

Микротвердость измеряют на металлографических шлифах. Методика подготовки шлифов имеет важное значение, так как глубина вдавливания индентора при определении микротвердости составляет несколько микрометров и соизмерима с глубиной получаемого в результате механического шлифования и полирования наклепанного поверхностного слоя.

Для испытаний поверхностно упрочненных материалов используют небольшие изделия с нанесенным на поверхность покрытием, либо специально изготовленные образцы (свидетели). Целесообразно иметь два комплекта образцов: один для испытаний с нагрузкой вдоль слоев покрытия

(для изготовления поперечных шлифов), другой - перпендикулярно слоям (для изготовления продольных шлифов). Шероховатость локального участка, на который будет наноситься отпечаток, должна быть не хуже Ra 0,32 мкм по ГОСТ 2789. При изготовлении шлифов следует исключать возможное изменение микротвердости покрытия (устранить наклеп и нагрев). Испытуемая поверхность должна быть сухой, без следов загрязнения. Чтобы обеспечить необходимое расположение осей индентора и поверхности образца, а также для устранения смещений, прогиба и поворота шлифа последний рекомендуется устанавливать на предметном столике прибора с помощью пластилина, в который предварительно вдавливается образец лабораторным ручным прессом.

При измерениях используют различные по форме и размерам алмазные наконечники (рис. 3.15). Наиболее распространен наконечник в виде четырехгранной пирамиды с квадратным основанием (пирамида Виккерса). Наконечник в форме трехгранной пирамиды (пирамида Берковича) применяют для заведомо твердых материалов ($HV > 1000$). Это обусловлено тем, что, несмотря на равновеликость площади боковой поверхности и высоте четырехгранной пирамиды, трехгранная имеет более совершенное заострение. Покрытия малой толщины и низкой твердости испытывают наконечником с формой рабочей части в виде четырехгранной пирамиды с ромбическим основанием (пирамида Кнупа). Бицилиндрический наконечник (индентор Гродзинского) используют для испытаний на микротвердость весьма тонких (менее 3 мкм) покрытий и пленок. Микротвердость обозначают HV , $H_{\blacktriangledown}$, $H_{\diamond}$ и H_{Φ} , соответственно.

Если число микротвердости указывается в кгс, то размерность не приводится, например, 140 $HV_{0,1}$ (140 – число твердости, 100 г – нагрузка на наконечник). Если число твердости выражено в МПа, то для него указывают единицу измерения (например, $HV_{0,05} = 3200$ МПа, 50 г – нагрузка).

При использовании метода восстановленного отпечатка площадь поверхности отпечатка может быть рассчитана по формуле

$$S = \frac{4ah}{2}, (3.10)$$

где h – глубина отпечатка, a – длина стороны квадрата отпечатка. Связь между стороной квадрата и глубиной отпечатка можно определить из геометрических соотношений для правильной пирамиды.

$$h = \frac{a}{2 \sin \frac{136^\circ}{2}} = \frac{a}{2 \cos 22^\circ} = \frac{a}{1,8544} . (3.11)$$

При измерениях параметров отпечатка обычно измеряют не длину стороны квадрата, а длину диагонали отпечатка d :

$$d^2 = 2a^2 (3.12)$$

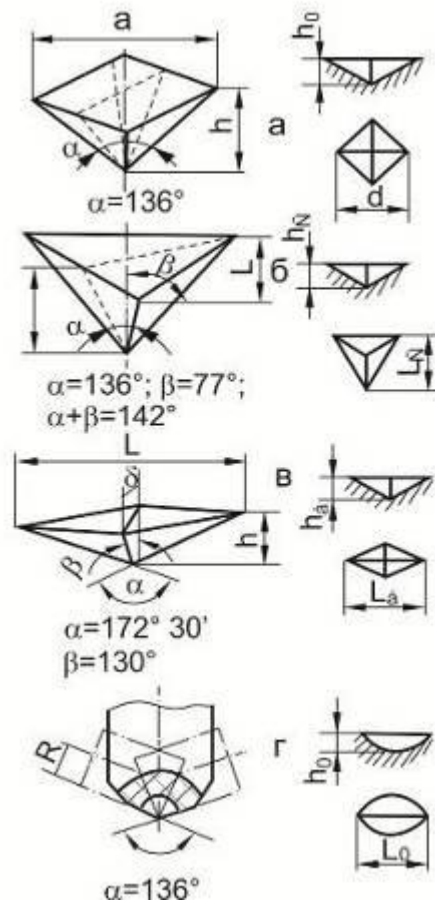


Рис. 3.15 – Формы алмазных наконечников: а – четырехгранная пирамида с квадратным основанием (пирамида Виккерса); б – трехгранная пирамида с основанием в виде равностороннего треугольника (пирамида Берковича); в – четырехгранная пирамида с ромбическим основанием (пирамида Кнупа); г – бицилиндрический наконечник (индентор Гродзинского)

Таким образом, число микротвердости (HV) при использовании четырехгранной пирамиды с квадратным основанием можно рассчитать по формуле:

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{0,102 \cdot 2F \sin d / 2}{d^2} = 0,189 \frac{F}{d^2} \quad (3.13)$$

Для трехгранной пирамиды с основанием в виде равностороннего треугольника число микротвердости ($H_{\blacktriangledown}$) вычисляют по формуле

$$H_{\blacktriangledown} = \frac{F}{S} = \frac{0,102 \cdot 3F \sin \alpha}{\sqrt{3}l^2} = 0,160 \frac{F}{l^2} \quad (3.14)$$

Проведя аналогичные вычисления для четырехгранной пирамиды с ромбическим основанием, число микротвердости ($H_{\diamond}$) вычисляют по формуле

$$H = 1,313 \frac{F}{l^2} \quad (3.15)$$

Для бицилиндрического наконечника число микротвердости (H_{Φ}) вычисляют по формуле

$$H = 0,425 \frac{F}{l^3} \quad (3.16)$$

В формулах использованы следующие обозначения:

- F – нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику, Н;
- S – условная площадь боковой поверхности полученного отпечатка, мм²;

- l – длина отпечатка, мм;
- d – среднее арифметическое длин обеих диагоналей квадратного отпечатка, мм;
- R – радиус цилиндра, равный 2 мм;
- α и β – углы разных заострений алмазных наконечников, град.

Микротвердость измеряют на металлографических шлифах с помощью специальных приборов – микротвердомеров, которые имеют в своем составе нагружающее устройство и микроскоп. Подробно оборудование и методика измерения микротвердости материалов изложена в лабораторном практикуме. Кратко процесс испытаний может быть описан следующим образом. Образец (например, основной металл—покрытие) устанавливают на предметном столике так, чтобы испытываемая поверхность была перпендикулярна направлению нагрузки и оси индентора. При помощи нагружающего устройства в поверхность образца вдавливают индентор. Образец нагружают плавно, с постоянной скоростью, не влияющей на размеры отпечатка. Для анизотропных покрытий одна из диагоналей отпечатков должна совпадать с ориентировкой слоистости. Индентор опускают в течение 15 с и выдерживают под нагрузкой 5-10 с. Слишком быстрое нагружение вызывает ударное воздействие индентора на поверхность покрытия и может привести к занижению оценок микротвердости вследствие проламывания участка покрытия над порой. Затем нагрузку снимают, а отпечаток от алмазной пирамиды перемещают в поле зрения микроскопа (рис. 3.16).

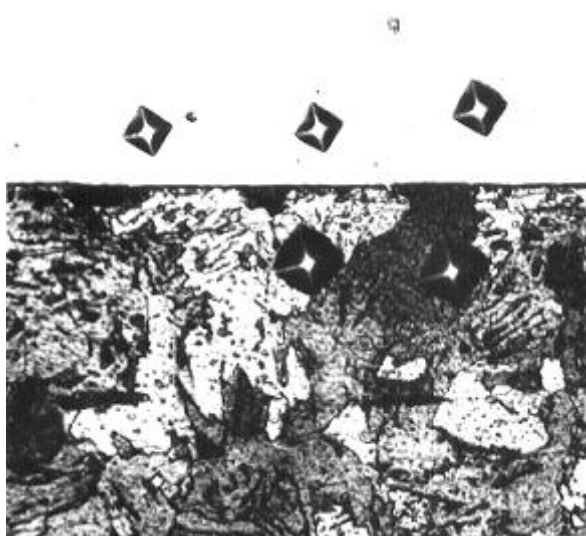


Рис. 3.16 – Отпечатки алмазной пирамиды на протравленном основном металле и покрытии (вверху)

Длину диагоналей измеряют окулярным микрометром или на экране. Для определения микротвердости принимается среднее значение длины диагоналей -- d . Требуемая точность результатов определяет количество отпечатков, однако, учитывая специфику строения покрытия, их должно быть не менее 30.

Участок, на который наносится отпечаток, не должен иметь трещин. Границы слоев, поры, включения должны располагаться на расстоянии, не меньшем двукратной величины диагонали отпечатка. Соседние отпечатки наносят так, чтобы промежутки между их центрами были больше диагонали отпечатка в 3 раза. На поперечных шлифах расстояние от центра отпечатка до наружного края образца должно быть не менее двойной длины диагонали. Если при испытаниях хрупких материалов на поверхности отпечатка или на прилегающих к нему участках обнаружены сколы и трещины, то результаты не учитываются. В этом случае (если не нужно определять коэффициент хрупкости) корректные значения микротвердости получают, последовательно уменьшая нагрузки до устранения сколов и трещин.

При выборе нагрузки для исследования продольных шлифов нужно исходить из соотношения предполагаемой толщины образца или покрытия с

глубиной отпечатка. Если толщина неизвестна, то рекомендуется измерить твердость несколько раз, последовательно увеличивая нагрузки. Если материал основы не влияет на результаты измерений микротвердости, то полученные значения будут близки. Если микротвердость при возрастании нагрузки будет уменьшаться или увеличиваться, то нагрузку снижают до совпадения или близости результатов при двух смежных нагрузках. При измерении микротвердости на продольных шлифах должно выполняться соотношение

$$h = \frac{d}{7} \leq \frac{\delta}{10}, \quad (3.17)$$

где δ – толщина образца или покрытия; h – глубина вдавливания; d – диагональ отпечатка.

Нарушение этого условия приводит к получению ложной зависимости микротвердости от толщины и нагрузки на индентор.

Минимальная толщина металлических образцов или покрытий может быть определена также по рекомендациям стандарта ГОСТ 9450 (рис 3.17). Соблюдение соотношения между толщиной образца или тонкого покрытия и глубиной отпечатка означает, с одной стороны, применение очень малых нагрузок, обеспечиваемых лишь оборудованием, управляемым микропроцессором, с другой – необходимость применения растровой электронной микроскопии для анализа малого отпечатка (≤ 3 мкм).

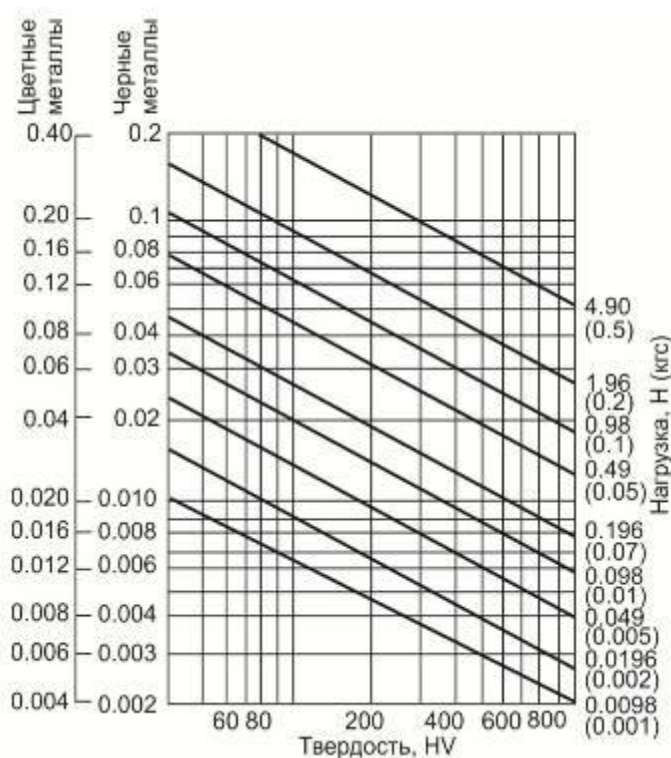


Рис. 3.17 – Наименьшая допускаемая толщина образца или покрытия

Микротвердость используют также для оценки поверхностного упрочнения материалов после высокоэнергетических воздействий (лазер, ультразвук, комбинированные обработки). Степень упрочнения обработанных поверхностей (ΔHV) определяют по формуле:

$$\Delta HV = \frac{HV - HV_1}{HV_1} \cdot 100, \quad (3.18)$$

где HV – микротвердость упрочненной поверхности,

HV_1 – микротвердость исходной поверхности

Значения микротвердости сравнимы при условии, что измерения проводились при одной нагрузке и аналогичных временных параметрах статического воздействия.

Даже для одинаковых покрытий, нанесенных по схожим технологиям, микротвердости по данным различных авторов отличаются на 20–50 %. Это объясняется неодинаковыми условиями испытаний, различными значениями пористости, анизотропии, микрохрупкости и химическими составами.

Измерения микротвердости на поперечных шлифах изделий с покрытием дают дифференцированную информацию о свойствах поверхностных слоев и, кроме того, полезны как сведения о толщине покрытия, оцениваемой по резкому спаду микротвердости на границе покрытие-основа (рис. 3.18).

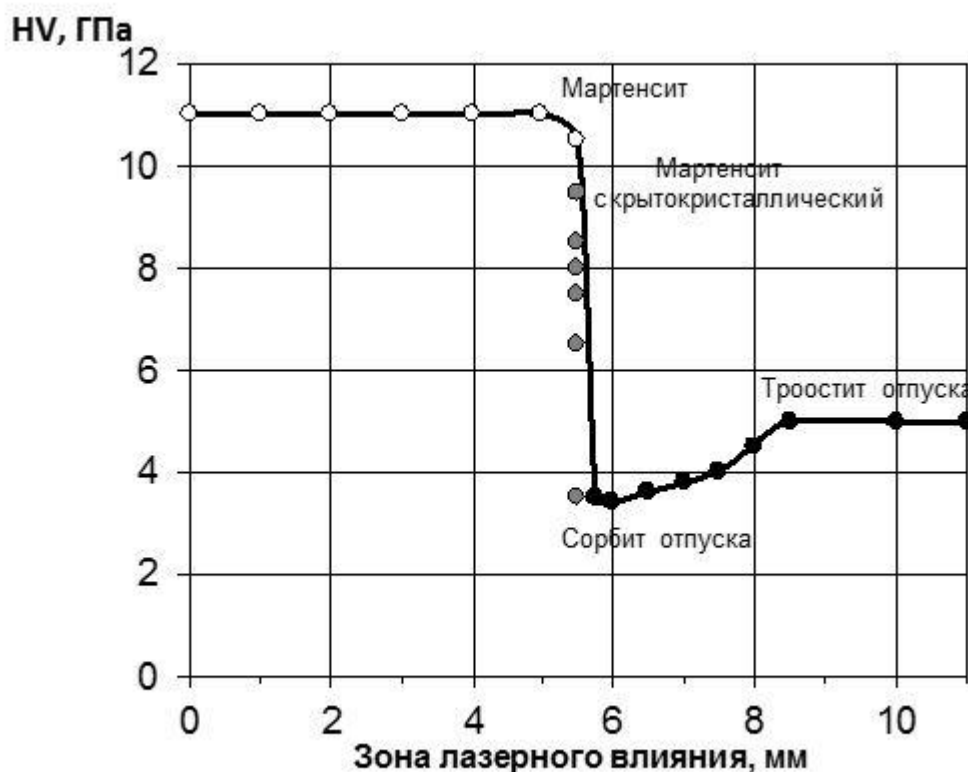


Рис. 3.18 – Микротвердость структурных составляющих по сечению зоны лазерного влияния

К сожалению, во многих публикациях приводятся значения микротвердости тонких покрытий, полученные без строгого выполнения рекомендаций стандартов на измерение микротвердости. Ошибка в сторону снижения микротвердости тем значительнее, чем меньше толщина покрытия и модуль упругости основы, на которую нанесено покрытие и больше нагрузка. В некоторых случаях ошибка может усугубляться плохой прочностью соединения покрытия с основным металлом.

Способ измерения микротвердости царапанием принципиально отличается от метода внедрения индентора и получил распространение в последние годы. Этот способ заключается в нанесении на испытываемую поверхность канавки и измерении ее ширины. Микротвердость определяют как отношение нагрузки, приложенной к алмазной пирамиде, к условной площади контакта пирамиды с испытываемой поверхностью. Последовательно изменяя нагрузку на индентор, добиваются такого положения, чтобы ширина канавки достигала 5, 10, 20 мкм. Нагрузку, при которой получилась заданная ширина канавки, называют твердостью по Мартенсу. Используют следующие способы царапания: ребром - для четырехгранной пирамиды, ребром или гранью - для трехгранной пирамиды. Материалы высокой твердости рекомендуется испытывать трехгранной пирамидой.

Весьма информативным является метод оценки твердости покрытий и поверхностных слоев царапанием поверхности косого шлифа алмазным индентором. Кроме твердости, оцениваемой по ширине царапины, испытания этим методом могут быть использованы для оценки хрупкости материала покрытия и его адгезии к основе, а также и других характеристик.

Приборы для измерения твердости выпускают многие отечественные и зарубежные фирмы. Отличительная особенность приборов иностранных фирм от российских заключается в том, что они преимущественно универсального типа. В одном приборе создаются нагрузки, позволяющие измерять твердость по двум, а иногда и по трем методам - Роквеллу, Бринеллю и Виккерсу. Кроме того, в приборах иностранных фирм иногда применяют нетрадиционные для России нагрузки и инденторы.

Метод по восстановленному отпечатку благодаря простоте и удобству является распространенным и широко используется в лабораториях и на производстве. Однако исследования последних десятилетий показали, что перспективным, объективным и производительным видом испытания на

микротвердость является метод испытания по невосстановленному отпечатку.

С.И. Булычев впервые показал перспективы испытания материалов непрерывным вдавливанием индентора. Он рассмотрел теоретические аспекты этого вопроса и отметил, что испытания материалов с постоянной регистрацией диаграммы вдавливания вступили в новый качественный этап своего развития. Было разработано специальное оборудование для измерения микротвердости материалов и покрытий, которое предназначено для исследования микромеханических свойств с постоянной регистрацией диаграммы вдавливания в координатах «усилие - глубина отпечатка».

Полученная на приборе диаграмма вдавливания позволяет, в частности, оценить особенности микродеформации в широком диапазоне прикладываемых усилий и глубин отпечатка; определить реологические характеристики поверхностных слоев испытываемого материала (микроползучесть, релаксацию); изучить процесс трещинообразования и его связь с контактным взаимодействием; дать интегральную оценку микромеханических свойств материала (микротвердость, упругость, пластичность).

3.4.6. Наноиндентирование

При использовании стандартных методов трудно, а порой и невозможно выдержать соотношение толщины покрытия и глубины вдавливания индентора. Кроме того, некорректно сопоставление результатов для покрытий, имеющих различную толщину или нанесенных на различные материалы, из-за пластической деформации основного металла и продавливания покрытия. Поэтому необходима корректировка результатов измерения с учетом толщины образца или покрытия и твердости основы. Альтернативой традиционному методу по восстановленному отпечатку для

тонких образцов и покрытий считается снятие зависимости « нанонагрузка - глубина отпечатка».

С середины восьмидесятых годов в практику исследований внедряются ультрамалые нагрузки. Непосредственное измерение твердости тонких (до 5 мкм) образцов или покрытий возможно лишь с применением дорогостоящего и сложного оборудования. В настоящее время приборы для непрерывной записи ультрамалых нагрузок и глубины вдавливания серийно выпускаются в Австралии, Англии, Дании, КНР, РФ, США, ФРГ, Швейцарии, Японии и др.

Под общим термином ‘*наноиндентирование*’ понимают методы и средства для испытаний и определения механических свойств материалов в наномасштабе. Первые исследования по наноиндентированию были опубликованы отечественными учеными полвека назад под названием «испытания непрерывным вдавливанием». В настоящее время большинство исследований в наномасштабе проводится с использованием методов нано- и микромеханических испытаний.

Наноиндентирование есть результат эволюции методов измерения твердости, в процессе которых простой прием измерения твердости превратился в тонкий многофункциональный исследовательский инструмент. Примерное соотношение работ, посвящённых исследованиям методами наноиндентирования в тех или иных группах материалов, показано на рис.

3.19.

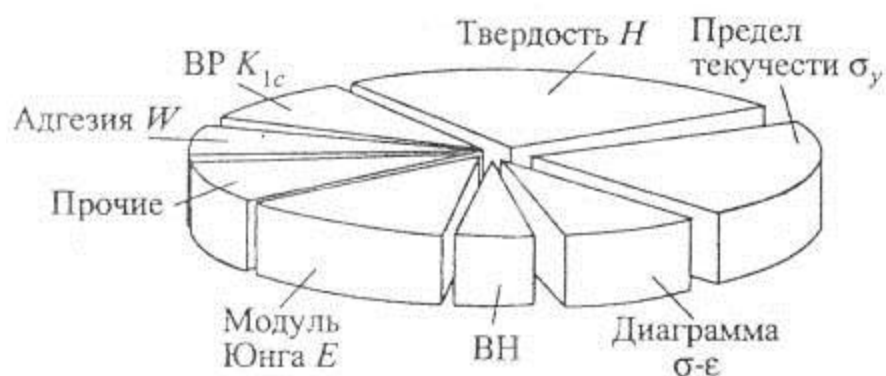


Рис. 3.19 – Основные физико-механические характеристики, извлекаемые методами наноиндентирования, и примерное соотношение интереса к ним: ВН -внутренние напряжения в приповерхностных слоях; ВР - вязкость разрушения (по Ю.И. Головину).

В практике наноиндентирования чаще других используют трёхгранный пирамидальный индентор Берковича, однако, стойкость последнего ниже, чем стойкость четырёхгранной пирамиды Виккерса. Индентор Кнупа также имеет четыре грани, но отличается от пирамиды Виккерса тем, что одна его грань превышает другую примерно в семь раз.

В связи с небольшой глубиной индентирования в микро- и нанодиапазоне во время подготовки поверхности образца следует предпринимать особые меры предосторожности. Необходимо использовать процесс полировки, подходящий для конкретных материалов (например, электрополировку). Проводить измерения, в частности в нано- и микродиапазонах, рекомендуется в контролируемых климатических условиях: в температурном диапазоне $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ и относительной влажности менее 50 %. Время приложения нагрузки и ее снятия - 30 с; время удержания максимальной нагрузки - 30 с. Во время измерений установка для испытаний должна быть защищена от ударов и вибраций, воздушных потоков и температурных колебаний, которые могут значительно повлиять на результаты измерений. Отпечатки должны отстоять от границ образца на расстояние не менее пяти их диаметров, и минимальное расстояние между

отпечатками должно, как минимум, в пять раз превышать самый большой диаметр отпечатка.

В современных приборах для наноиндентирования нагрузки варьируются от единиц микроныютон до тысяч миллиныютон с прерывностью до долей наноныютон. Некоторые технические характеристики одного из серийно выпускаемых в США наноиндентометров: максимальная нагрузка -- 10Н, разрешение по нагрузке – 50нН, максимальная глубина внедрения индентора-500 мкм, разрешение по глубине внедрения индентора -- $<0,01$ нм, размер рабочей области образца --100x100 мм, разрешение атомно- силового микроскопа <1 нм.

3.5. Ударная вязкость

3.5.1. Понятия и определения

При эксплуатации детали машин часто подвергаются воздействию ударных нагрузок. При таком характере нагружения скорость деформирования значительна, а процессы релаксации напряжений в материале протекают иным образом, чем при статическом нагружении. Для оценки способности материалов работать при ударных нагрузках и выявления их склонности к хрупкому разрушению проводят *испытания на ударный изгиб*. ГОСТ 9454 устанавливает метод испытания на ударный изгиб при температуре от минус 100 до плюс 1200 °С, распространяется на черные и цветные металлы и сплавы и соответствует международным стандартам ИСО 83 и ИСО 148. Суть испытаний заключается в динамическом нагружении образца по схеме трехточечного изгиба (**рис. 3.20**). Образец с надрезом устанавливают горизонтально на опоры таким образом, чтобы надрез располагался в середине пролета между опорами. Затем по образцу наносят удар со стороны, противоположной надрезу, в направлении, перпендикулярном продольной оси образца.

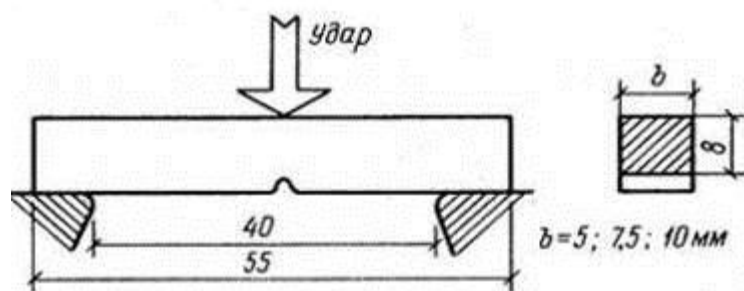


Рис. 3.20 – Схема испытаний на ударный изгиб

Испытания на ударный изгиб являются одним из наиболее структурно чувствительных методов контроля качества металлических материалов. При ударных испытаниях на изгиб образцов напряжения концентрируются в ограниченном объеме материала вблизи вершины надреза, что приводит к локализации процессов пластической деформации. Концентрация напряжений у надреза и рост предела текучести в результате высокой скорости нагружения создают благоприятные условия для хрупкого разрушения материала. С помощью испытаний на ударный изгиб выявляют такие эффекты, как склонность металла к хладноломкости, обратимая и необратимая отпускные хрупкости и т.д.

При испытании на ударный изгиб основной измеряемой величиной, характеризующей сопротивление материала динамическому воздействию, является работа, затрачиваемая на разрушение при кратковременном (менее 10^{-3} с) ударном нагружении. По результатам вычисляют *ударную вязкость* -- работу, отнесенную к площади поперечного сечения образца в месте концентратора (сечение нетто). Полученная характеристика дает возможность судить о хрупкости и вязкости материала при данных условиях испытаний. Ударную вязкость считают мерой надёжности материала. Более объективные данные о надёжности можно получить при анализе трещиностойкости материала. В качестве дополнительного критерия используют процентное соотношение хрупкой и вязкой составляющих на поверхности излома.

Ударные испытания проводят при комнатной, отрицательной и повышенной температуре. Одной из важнейших задач ударных испытаний является оценка склонности материала к хрупкому разрушению при отрицательной температуре. Материалы на основе железа, вольфрама, цинка и некоторых других металлов при комнатной температуре разрушаются вязко. Однако с понижением температуры характер их разрушения изменяется, увеличивается доля микрообъемов материала, разрушение в которых происходит по механизму хрупкого скола. Это приводит к снижению ударной вязкости. Причины этого явления могут быть различными – структурная и химическая неоднородность материала, наличие в нем неметаллических включений и вредных примесей и т.д. Для оценки склонности материалов к хрупкому разрушению при снижении температуры проводят испытания с построением кривой температурной зависимости ударной вязкости и определением температуры хрупко-вязкого перехода (рис. 3.21). Поскольку хрупкий и вязкий характер разрушения при ударном изгибе для стали можно четко различить по виду излома, порог хладноломкости можно определить по количеству волокнистой составляющей в изломе, которая имеет матовую поверхность в отличие от блестящих областей хрупкого разрушения. За порог хладноломкости принимается температура, при которой на поверхности излома доля волокнистой структуры составляет 50 %. Это соответствует приблизительно 50 % -ному падению ударной вязкости металла. Для ответственных деталей за критическую температуру хрупкости нередко принимают температуру, при которой в изломе имеется около 90 % волокнистой составляющей, а ударная вязкость сохраняет высокое значение. Следует учитывать, что порог хладноломкости не является постоянной характеристикой металла, а зависит от его структуры, условий испытаний, типа концентратора напряжений, размера образца и т. д.

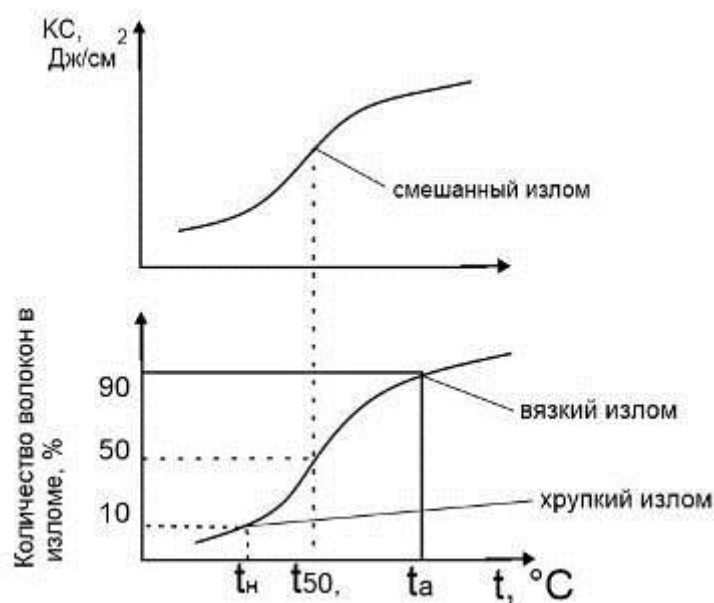


Рис.3.21 – Влияние температуры на ударную вязкость материала КС и вид излома.

3.5.2. Образцы, оборудование, испытания

В соответствии с ГОСТ 9454 основным типом является образец прямоугольной формы длиной 55 мм с сечением 10x10 мм, в центральной части которого наносят надрез. Допускается испытывать образцы толщиной 7,5, 5 и 2 мм. Образец может иметь надрез U-образной формы (образец Шарпи) с радиусом закругления в вершине надреза 1 мм (рис. 3.22). Образец с V-образным концентратором (образец Менаже) имеет острый надрез с радиусом закругления в вершине 0,25 мм. Третий тип образцов имеет надрез с предварительно выращенной усталостной трещиной (Т-образный образец). Типы стандартных образцов по ГОСТ 9454, и области их применения указаны в таблице 3.6.

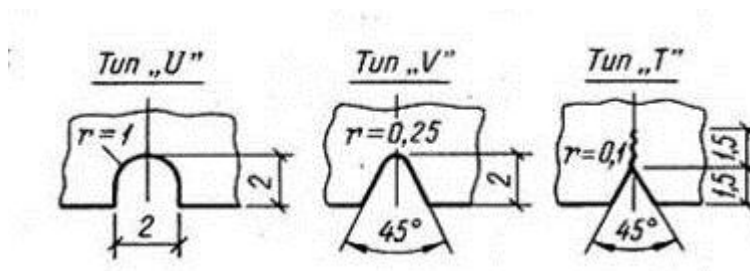


Рисунок 3.22 – Типичные размеры надрезов

Таблица 3.6 - Область применения образцов

Вид концентратора	Тип образца	Область применения
U	1-10	При выборе и приемо-сдаточных испытаниях металлов и сплавов
V	11-14	При выборе и приемо-сдаточных испытаниях металлов и сплавов для конструкций повышенной степени надежности (летательные аппараты, транспортные средства, трубопроводы, сосуды давления и т. п.)
T	15-20	При выборе и приемочном контроле металлов и сплавов для особо ответственных конструкций, для эксплуатации которых оценка сопротивления развитию трещины имеет первостепенное значение. При исследовании причин разрушения ответственных конструкций.

Концентратор напряжений (надрез) наносят фрезой, наждачным или алмазным отрезным кругом. Концентратор вида Т получают в вершине начального надреза при плоском циклическом изгибе образца. Число циклов, необходимое для получения трещины заданной глубины, должно быть не менее 3000. Неметаллические неорганические (керамические) материалы допускается испытывать на образцах без концентратора.

Испытания проводят на маятниковых копрах (рис.3.23), представляющих собой чугунное основание 2 с вертикальными стойками 3, в верхней части которых на оси подвешен маятник 8.

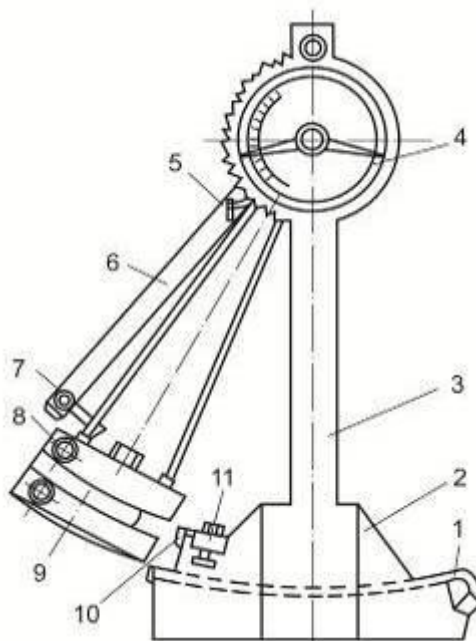


Рис. 3.23 – Схема маятникового копра: 1 – тормозное устройство; 2 – основание; 3 – вертикальная стойка; 4 – шкала; 5 – собачка; 6 – подъемная рамка; 7 – защелка; 8 – маятник; 9 – нож (молот); 10 – угольник; 11 – опора.

В специальном вырезе маятника закрепляется сменный нож (молот) 9, предназначенный для разрушения образца, установленного на опорах. Положение образца по высоте может регулироваться перемещением опор 11 с помощью угольников 10. Подъемная рамка 6 с защелкой 7 позволяет задавать нужные углы подъема маятника и удерживать его в поднятом положении при помощи двух собачек 5. Тормозное устройство 1 служит для резкого замедления перемещения маятника при повторном качании после разрушения образца. Шкала 4 или аналоговое отсчетное устройство позволяет определять работу, затраченную на деформацию и разрушение образца. На современных маятниковых копрах предусмотрены автоматический подъем маятника и подача образца, дистанционный спуск, цифропечатающее устройство.

Образец должен свободно лежать на опорах копра. Устанавливают образцы с помощью шаблона, обеспечивающего симметричное

расположение концентратора относительно опор с погрешностью не более $\pm 0,5$ мм.

Если образцы испытывают при повышенных или пониженных температурах, то для нагрева или охлаждения их помещают в термостат и выдерживают не менее 15 мин при нужной температуре. Термостат установки обеспечивает равномерное охлаждение или нагрев, отсутствие агрессивного воздействия окружающей среды на образец и возможность контроля температуры. Для обеспечения требуемой температуры испытания образцы перед установкой на копер должны быть переохлаждены (при температуре испытания ниже комнатной) или перегреты (при температуре испытания выше комнатной). Степень переохлаждения или перегрева должна обеспечивать требуемую температуру испытания и определяется экспериментальным путем.

При проведении испытаний (рис. 3.24) маятник копра поднимают и закрепляют фиксатором в исходном верхнем положении на высоте от 0,8 до 2,5 м. Это обеспечивает скорость ножа маятника в момент удара в диапазоне 4 - 7 м/с. По шкале фиксируют угол подъема маятника α .

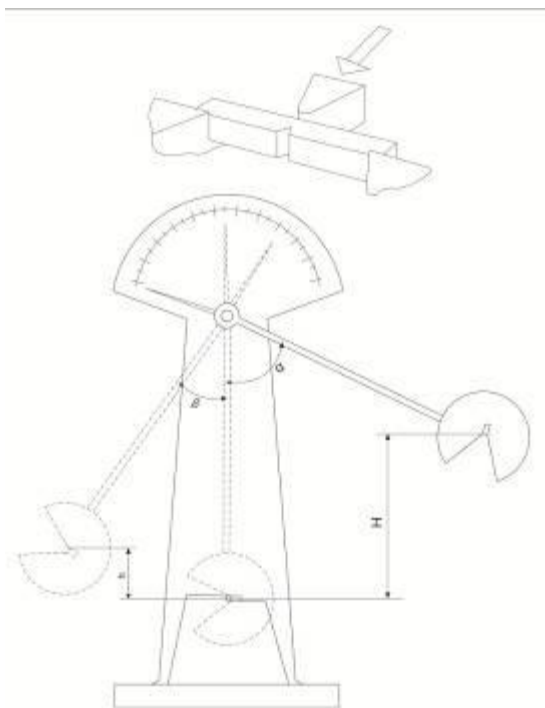


Рис. 3.24 – Схема испытаний на ударный изгиб

Под действием собственного веса маятник разгоняется, наносит удар по образцу и разрушает его. Далее, по инерции маятник поднимается на угол β относительно вертикальной оси копра. Величина угла подъема маятника тем меньше, чем больше работа K , которая затрачивается на деформацию и разрушение образца. Величина работы деформации и разрушения определяется разностью потенциальных энергий маятника в начальный и конечный момент испытания.

$$K=P(H-h), (3.19)$$

где P – вес маятника; H и h – высоты начального и конечного подъема маятника соответственно.

Если известна длина маятника L , то высоту начального и конечного подъема можно определить по углу подъема перед началом испытаний β и после разрушения образца α . Таким образом, работу удара можно рассчитать по следующей формуле:

$$K = PL(\cos\beta - \cos\alpha) (3.20)$$

При фиксированном угле подъема маятника шкалу копра можно предварительно проградуировать в единицах работы. Часть работы двигающегося маятника (1-2 %) затрачивается на преодоление сопротивления воздуха, на трение в подшипниках и на упругую деформацию штанги маятника, поэтому желательно, чтобы угол β после разрушения образца был небольшим.

Работу удара определяют по шкале маятникового копра или аналоговых отсчетных устройств. Определить работу разрушения можно также по диаграмме «нагрузка-прогиб», подсчитав площадь под диаграммой. В этом случае на копре должны быть установлены датчики для измерения динамической нагрузки и прогиба образца. Сигналы, поступающие при ударе с датчиков, пропорциональные приложенному усилию и прогибу, передаются по соответствующим измерительным каналам на регистрирующее устройство.

Удар производят бойком по поверхности образца, противоположной поверхности с концентратором, причем линия удара должна проходить через концентратор, посередине между опорами. Ударную вязкость (КС), (Дж/см²) вычисляют по формуле

$$КС = \frac{K}{S_0} \quad (3.21)$$

где K – работа, затраченная на разрушение образца, Дж;

S_0 – площадь поперечного сечения образца в месте концентратора, см².

За результат испытания принимают работу удара или ударную вязкость для образцов с концентраторами видов U и V и ударную вязкость для образцов с концентратором вида T. Работу удара обозначают двумя буквами (KU, KV или KT) и цифрами. Первая буква (K) – символ работы удара, вторая буква (U, V или T) – вида концентратора. Последующие цифры обозначают: первая цифра – максимальную энергию удара маятника, вторая – глубину концентратора и третья – ширину образца. Для обозначения работы удара и

ударной вязкости при пониженной и повышенной температурах вводится цифровой индекс, указывающий температуру испытания. Цифровой индекс ставят вверху после буквенных составляющих.

Например: $KCV^{-40}50/2/2$ - работа удара, определенная на образце с концентратором вида V при температуре минус 40 °С. Максимальная энергия удара маятника 50 Дж, глубина концентратора 2 мм, ширина образца 2 мм.

$KCT^{+100}150/3/7,5$ - ударная вязкость, определенная на образце с концентратором вида T при температуре плюс 100 °С. Максимальная энергия удара маятника 150 Дж, глубина концентратора 3 мм, ширина образца 7,5 мм.

KCU (KCV) - ударная вязкость, определенная на образце с концентратором вида U (V) при комнатной температуре. Максимальная энергия удара маятника 300 Дж, глубина концентратора 2 мм, ширина образца 10 мм.

Процент и форма вязкой составляющей в изломе ударных образцов характеризует сопротивление материала хрупкому разрушению. Например, хрупкая составляющая в изломе образца сечением 8x10 мм имеет вид трапеции (рис. 3.25.).

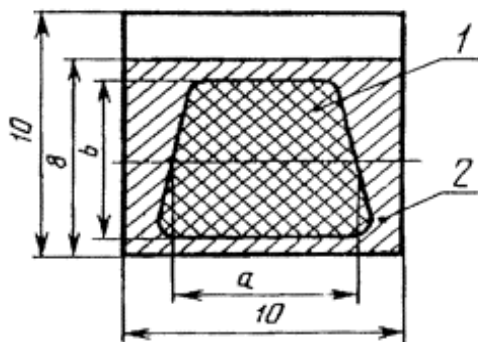


Рис.3.25 – Пример излома образца низкоуглеродистой стали. 1 – площадь, занимаемая хрупкой составляющей; 2 – площадь, занимаемая вязкой составляющей; a, b – размеры трапеции

Подробно порядок проведения испытаний по определению показателей ударной вязкости описан в лабораторном практикуме.

Список литературы

1. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. - М.: Металлургия, 1979. - 496 с.
2. Батаев А.А., Батаев В. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение. Учебное пособие. Новосибирск: НГТУ .- 2002. - 383 с.
3. Батаев В.А., Батаева З. Б. Материалы с нанокристаллической структурой. Учебное пособие.- Новосибирск: НГТУ, 2007. - 264 с.
4. Вербицкая А.Г., Кирносов В.И. Определение механических свойств материалов. - М.: Издательство стандартов, 1984. - 192 с.
5. Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности. - М.: Машиностроение, 2009. - 312 с.
6. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. – М.: Наука, 1976. – 230 с.
7. Костин П. П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. - М.: Машиностроение, 1990. - 256 с.
8. Криштал М.А., Головин И.С. Внутреннее трение и структура металлов. – М.: Металлургия, 1976. – 376 с.
9. Рыжонков Д.И., Левина В.В., Дзидзигури Э.Л. Наноматериалы. Учебное пособие. - М.: БИНОМ, 2008. - 365 с.
10. Тушинский Л. И., Синдеев В. И., Плохов А. В. Структура и механические свойства модифицированных поверхностей машиностроительных материалов. Учебное пособие.- Новосибирск: НГТУ, 1996.- 193с.

Глава 4. Износостойкость и испытания на изнашивание

4.1. Термины и определения

Термины и определения в области трения и изнашивания устанавливают ГОСТ 23.002 и ГОСТ 27674. Некоторые из них приведены в табл.4.1.

Таблица 4.1 - Основные термины и определения

Термин	Определения
Общие понятия	
<i>Внешнее трение</i>	Сопротивление относительно перемещению, возникающему между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним, сопровождаемое диссипацией энергии
<i>Изнашивание</i>	Процесс разрушения и отделения материалов с поверхности твердого тела и (или) накопление остаточной деформации при трении, проявляющейся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела
<i>Износ</i>	Результат изнашивания, определяемый в установленных единицах (значение износа может выражаться в единицах длины, объема, массы)
<i>Износостойкость</i>	Свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости или интенсивности изнашивания
Виды и характеристики внешнего трения	
<i>Трение покоя</i>	Трение двух тел при микросмещениях до перехода к относительному движению
<i>Трение движения</i>	Трение двух тел, находящихся в относительном движении
<i>Трение скольжения</i>	Трение движения, при котором скорости тел в точке касания различны по величине и направлению, или отдельно по величине или направлению
<i>Трение качения</i>	Трение движения двух твердых тел, при котором их скорости в точках касания одинаковы по величине и направлению
<i>Сила трения</i>	Сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, тангенциально направленная к общей границе между этими телами
<i>Коэффициент трения</i>	Отношение силы трения двух тел к нормальной силе, прижимающей тела друг к другу
<i>Поверхность трения</i>	Поверхность тела, участвующая в трении
Характеристики изнашивания	
<i>Предельный износ</i>	Износ, соответствующий предельному состоянию изнашивающего изделия или его составной части
<i>Допустимый износ</i>	Значение износа, при котором изделие сохраняет работоспособность. (Допустимый износ меньше предельного)
<i>Местный износ</i>	Износ на отдельном участке поверхности трения
<i>Этюра износа</i>	Графическое изображение распределения значений местного износа

Термин	Определения
	по поверхности трения или по определенному его сечению
<i>Скорость изнашивания</i>	Отношение значения износа к интервалу времени, в течение которого он возник. (Различают мгновенную - в определенный момент времени) или среднюю скорость изнашивания (за определенный интервал времени)
<i>Интенсивность изнашивания</i>	Отношение значения износа к обусловленному пути, на котором происходило изнашивание, или к объему выполненной работы. (Выбор единиц объема и выполненной работы определяется в каждом отдельном случае. Различают мгновенную и среднюю интенсивность изнашивания.)
Явления и процессы при трении и изнашивании	
<i>Схватывание при трении</i>	Местное соединение двух твердых тел, происходящее вследствие действия молекулярных сил при трении
<i>Перенос материала</i>	Материал одного твердого тела соединяется с материалом другого, и, отрываясь от первого, остается на поверхности второго
<i>Заедание</i>	Возникновение и развитие повреждений поверхностей трения вследствие схватывания и переноса материала. (Заедание может завершиться прекращением относительного движения)
<i>Задир</i>	Повреждение поверхности трения в виде широких и глубоких борозд в направлении скольжения
<i>Царапание</i>	Образование углублений на поверхности трения в направлении скольжения при воздействии выступов твердого тела или твердых частиц
<i>Отслаивание</i>	Отделение с поверхности трения материала в форме чешуек при усталостном изнашивании
<i>Выкрашивание</i>	Отделение частиц материала при усталостном изнашивании, приводящее к образованию ямок на поверхности трения
<i>Приработка</i>	Изменение геометрии поверхностей трения, физико-химических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения, обычно проявляющееся при постоянных внешних условиях в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания
Триботехнические характеристики материалов	
<i>Совместимость при трении</i>	Свойство материалов и сопряженных поверхностей предотвращать схватывание при трении
<i>Прилегаемость при трении</i>	Свойства материала при трении увеличивать поверхность трения упругим и пластическим деформированием поверхностного слоя
<i>Прирабатываемость</i>	Свойства материала уменьшать силу трения, температуру и интенсивность изнашивания в процессе приработки
<i>Износостойкость материала</i>	Свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения
<i>Относительная износостойкость</i>	Свойство материалов, характеризуемое отношением интенсивностей изнашивания двух материалов при работе в одинаковых условиях. (Обычно один из материалов принимается за эталон.)

Согласно ГОСТ 27674 износостойкость определяется триботехническими характеристиками конструкционных и смазочных материалов и параметрами нагружения сопряжения. Оценочным показателем износостойкости

сопряжений, работающих при трении скольжения, качения и качения с проскальзыванием, является безразмерный показатель износостойкости I , рассчитываемый по формуле

$$I = \frac{\Delta L}{\Delta H}, \quad (4.1)$$

где ΔL - интервал пути трения, измеряемый в единицах пути трения (одинаковых с ΔH);

ΔH - приращение линейного износа.

При неравномерном распределении износа по поверхностям трения износостойкость определяют в установленном месте (сечении, точке) или в месте наибольшего износа. Типичные значения износостойкости, режимы трения ряда деталей распространенных сопряжений приведены в таблице 4.2

Табл.4.2 Типичные значения износостойкости, режимы трения ряда деталей для распространенных триботехнических сопряжений

Узел трения, тип машины	Изнашиваемая деталь. Ее материал	Условия изнашивания		Показатель износостойкости
		Контртело. Материал	Параметры нагружения. Среда	
1. Цилиндропоршневая группа двигателя автомобиля	Поршневое кольцо. Чугун серый	Гильза цилиндра. Чугун серый	$v = 7-20$ м/с.	$10^{12}-10^{11}$
	Гильза цилиндра. Чугун серый	Поршневое кольцо. Чугун серый	Масло марки М10Г ₁	10^{11}
2. Цилиндропоршневая группа двигателя компрессора	Поршневое кольцо. Графит марки АО - 1500	Гильза цилиндра. Чугун серый	$q = 0,4$ МПа; $v = 3$ м/с. Влажная двуокись углерода	$2 \cdot 10^{10}$
			$q = 8$ МПа; $v = 1,2$ м/с. Влажная двуокись	$2 \cdot 10^9$

			углерода	
3. Токарный станок	Направляющие станины. Чугун марки СЧ21	Направляющие салазок суппорта. Чугун марки СЧ21	$q = 0,05-0,5$ МПа; $v = 0,01$ м/с.	$10^{10}-10^9$
4. Колодочный тормоз	Тормозная колодка. Фрикционная пластмасса	Бандаж колеса или барабан. Специальный чугун	$q = 1$ МПа; $v = 10$ м/с.	10^7-10^6
5. Дисковый тормоз	Тормозной элемент. Фрикционная пластмасса	Тормозной диск. Чугун легированный	$q = 2,5$ МПа; $v = 25$ м/с.	$10^{10}-10^6$
6. Камерный тормоз	Тормозная накладка. Фрикционная пластмасса	Барабан. Сталь углеродистая	$q = 1$ МПа; $v = 15$ м/с.	10^9-10^6
7. Подшипник скольжения	Вал. Сталь с твердым смазочным покрытием типа ВНИИНП	Втулка. Сталь углеродистая	$q = 20$ МПа; $v = 0,5$ м/с. Вакуум 10^{-8} (температура 373 К)	10^8-10^7
8. Зубчатые передачи мелко модульные	Шестерня. Металлокерамика марки ВАМК	Зубчатое колесо. Металлокерамика марки ВАМК	$q = 1$ МПа; $v = 11$ м/с. Вакуум 10^{-8} (температура 473 К)	10^8-10^7
	Шестерня. Сталь с твердым смазочным покрытием типа ВНИИНП	Зубчатое колесо. Сталь с твердым смазочным покрытием типа ВНИИНП		10^6-10^5
9. Торцевые уплотнения скважного насоса	Уплотнение типа МГФФ	Сталь углеродистая легированная	$q = 1$ МПа; $v = 3$ м/с. Вода	$2 \cdot 10^9$
	Уплотнение типа 2П-1000-Ф	Силицированный графит	$q = 5$ МПа; v	$2 \cdot 10^{10}$

			= 3 м/с. Вода	
10. Резцы (точение на токарном станке)	Твердый сплав типа ВК-8	Сталь марки 0	$q = 400 \text{ МПа};$ $v = 2 \text{ м/с.}$	$2 \cdot 10^7$
	Минералокерамика типа ЦМ-332	Сталь углеродистая	Смазочная охлаждающая жидкость (СОЖ)	$2 \cdot 10^5$
11. Мерительный инструмент	Калибр-скоба с измерительным наконечником. Сплав типа ВК	Вал. Сталь марки ШХ15	$q = 40 \text{ МПа}$	$1,4 \cdot 10^{10}$
	Резьбовой калибр. Сталь марки У10А термообработанная	Гайка. Чугун марки СЧ12		$5 \cdot 10^9$
Обозначения: v -скорость скольжения; q - давление.				

4.2. Актуальные направления повышения износостойкости

Условия контактирования двух тел, приводящие к поверхностному разрушению, весьма многообразны. Назовем лишь некоторые: скольжение со смазкой и без смазки; контакт с закрепленным и незакрепленным абразивом; ударно—абразивное нагружение, фреттинг-коррозия и др. Нагружающее воздействие на поверхность у них различно по величине, масштабу и времени. Это приводит к тому, что материал, имеющий высокую износостойкость в одних условиях, может активно разрушаться в других. Кроме того, стойкость материала может сильно меняться при изменении лишь одного параметра (например, нагрузки) в рамках одной схемы испытаний. Поэтому большое значение имеет понимание механических аспектов того или иного вида изнашивания. Сюда входят построение модели взаимодействия двух твердых тел, микрогеометрия их поверхностей, распределение напряжений в телах при контакте. Модели должны описывать напряженно-деформированное состояние контактирующих поверхностей.

Они дают ключ к пониманию причин, вызывающих силу трения и выделение энергии в месте контакта. Последнее очень важно, так как интенсивность энергетического воздействия на поверхность определяет структурные изменения в материале и его разрушение.

Важно знать корреляцию между износостойкостью сплава в тех или иных условиях и его механическими свойствами. Это облегчает прогнозирование срока службы материала без проведения натурных или моделирующих испытаний. Однако многофакторность процесса изнашивания затрудняет установление таких зависимостей. В. Н. Кашеев для абразивной износостойкости (K_u) ряда сплавов установил зависимости типа $K_u = f(\sigma_m)$, $K_u = f(\delta)$, $K_u = f(\psi)$. Однако частный характер не позволяет перевести их на другие условия испытаний. Кроме того, очевидно, что большую роль играют особенности состава и структуры сплавов даже при одинаковых показателях предела текучести или пластичности.

В последнее время сделан ряд попыток установить корреляцию между износостойкостью и трещиностойкостью. Вероятно, процесс разрушения материала как образование новых поверхностей лучше контролируется именно характеристиками сопротивления развитию трещин. Особенно ясно это проявляется при абразивном изнашивании.

Многочисленные исследования процесса изнашивания показали, что непрерывный поток энергии, выделяющийся в месте контакта трущихся тел, вызывает сильные структурные изменения материалов. Образующиеся в результате этого вторичные структуры, например, так называемый «белый слой» являются экраном, защищающим деталь от разрушения. Это явление отражено в универсальном принципе структурно-энергетической приспособляемости материалов при трении. Л.И.Бершадский связывает механизм образования вторичных структур с процессами самоорганизации в трибосистеме.

Знание структур, обеспечивающих высокую износостойкость, еще не означает повышение стойкости реальных деталей. Необходимо научиться создавать нужные структуры в поверхностных слоях материала. Поэтому наряду с изучением закономерностей трения и изнашивания встают вопросы разработки технологий поверхностного упрочнения. Эффективным технологическим способом упрочнения поверхности деталей может стать кратковременное высокоэнергетическое (лазерное, электронное, плазменное) воздействие на поверхность. Это позволяет существенно изменять структуру, не меняя химического состава сплава. Основные особенности таких способов - высокоскоростной нагрев и большие скорости охлаждения, которые могут переводить сплав в метастабильное или даже аморфное состояние.

Другая группа технологий предусматривает изменение структуры поверхностных слоев. К ним относится диффузионное насыщение поверхности и нанесение покрытий. Они обеспечивают экономию дорогостоящих легирующих элементов и цветных сплавов, оптимальное сочетание свойств сердцевины и поверхности. К достоинствам технологии нанесения покрытий относится также возможность восстановления изношенных деталей. Применение комбинированных методов, сочетающих объемную и поверхностную обработки, позволяет повышать конструктивную прочность деталей за счет того, что сердцевина детали упрочняется одними дислокационными механизмами (размельчением фаз, созданием устойчивых субзеренных дислокационных построений), а рабочая поверхность - другими (увеличением плотности дислокаций, выделением избыточных фаз, твердорастворным упрочнением).

Согласно структурной теории конструктивной прочности Л.И. Тушинского только два дислокационных механизма из пяти полностью удовлетворяют условиям повышения конструктивной прочности сталей и сплавов. Как указывалось выше, это субструктурное упрочнение, т. е. создание

полигонально-ячеистых дислокационных построений ($\sigma_{д.п.я}$) и размельчение зерен (фаз сплава) (σ_3).

Если изделие конструируют по принципу композиционного материала с реализацией комбинированного упрочнения - объемного и поверхностного - то открываются возможности успешного использования всех дислокационных механизмов упрочнения. Создание полигонально-ячеистых дислокационных построений и размельчение зерен традиционно обеспечивают объемное упрочнение. Повышение плотности дислокаций «леса» ($\sigma_{д.л}$), образование пересыщенных твёрдых растворов (σ_p) и выделение частиц второй фазы (фаз твёрдых химических соединений) (σ_ϕ) при нанесении покрытий упрочняют поверхность и делают ее износостойкой. Такой подход к повышению износостойкости деталей позволяет по-новому рассматривать и всю проблему поверхностного упрочнения в целом. С этих позиций покрытия рационально применять не только для восстановления изношенных поверхностей, но и главным образом при производстве новых деталей машин, работающих в условиях изнашивания.

Итак, можно выделить следующие актуальные направления в решении проблемы повышения износостойкости материалов:

- анализ возможных моделей процесса изнашивания и его механических аспектов;
- изучение возможности прогнозирования износостойкости по стандартным механическим свойствам; корреляция с трещиностойкостью;
- исследование структурных особенностей поверхностей, синергетический подход к явлению приспособляемости;
- разработка новых сплавов и методов создания оптимальных структур поверхностей при энергетических воздействиях;
- диффузионное насыщение поверхностей и нанесение износостойких покрытий.

Наиболее надёжной проверкой правильности выбора материала или способов его обработки применительно к определенным деталям машин являются испытания детали непосредственно на машине в условиях эксплуатации (натурные испытания). Такой метод используется, однако он связан с практическими трудностями: большая длительность испытаний, необходимость демонтажа машины для установления величины износа. Результаты испытаний на изнашивание в этом случае могут оцениваться по изменению служебных свойств машины, по изменению размеров деталей, а также косвенным путем, например, по увеличению утечки масла. Из-за трудности натурных испытаний весьма широкое распространение на практике получили различные лабораторные методы испытаний на изнашивание. Многообразие схем испытаний в зависимости от видов абразивного изнашивания можно условно разбить на следующие группы:

- изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы;
- ударно-абразивное изнашивание;
- изнашивание частицами, находящимися в зазоре (абразивно-масляной прослойкой);
- газо- и гидроабразивное изнашивание;
- фреттинг-коррозия.

Различие в механизмах изнашивания обуславливает необходимость рассмотреть каждую группу испытаний в отдельности (рис. 4.1).

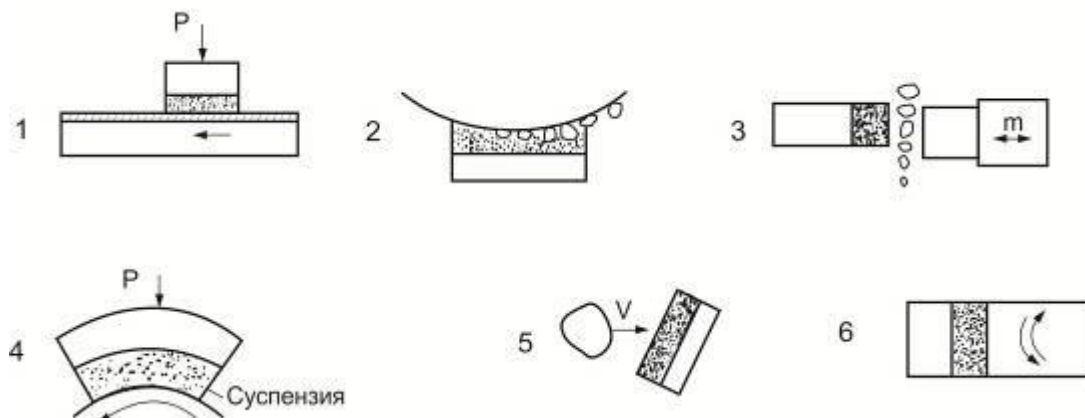


Рис. 4.1 - Схемы испытаний на изнашивание материалов в контакте с абразивными частицами: 1 – о закреплённый абразив; 2 – о незакреплённый абразив; 3 – ударно-абразивное; 4 – абразиво-масляной прослойкой; 5 – газо- (гидроабразивное); 6 – фреттинг-коррозия

4.3. Абразивное изнашивание

4.3.1. Понятия и определения

Все виды абразивного изнашивания относятся к механическому, т.е. к разрушению и отделению материала с поверхности в результате механических воздействий. *Абразивное изнашивание* - это механическое изнашивание материалов в основном при режущем или царапающем действии твердых частиц, находящихся в свободном или закреплённом состоянии. *Газоабразивное (гидроабразивное) изнашивание* - это результат действия твердых частиц, взвешенных в газе (жидкости) и перемещающихся относительно изнашивающегося тела. *Ударно-абразивное изнашивание* наблюдается при динамическом контакте взаимодействующих поверхностей, если между ними есть частицы, превосходящие по твердости поверхности индентора и изделия.

Выбор метода испытаний на изнашивание определяется, прежде всего, целью исследования. При этом решают следующие задачи: изучают процесс для выявления общих закономерностей изнашивания; определяют влияние технологий упрочнения на износостойкость; оценивают влияние структуры и свойств материала на износостойкость при данных условиях внешнего воздействия; выбирают оптимальную технологию упрочнения для работы в конкретных условиях. При этом нужно подбирать схему, переменные параметры нагружения и рабочую среду по возможности более близкими к эксплуатационным.

Большинство из рассмотренных ниже методов испытаний установлены нормативными документами, входящими в Комплекс государственных

стандартов по обеспечению износостойкости изделий. Одной из задач Комплекса является установление системы единых критериев методов и средств расчетной и экспериментальной оценки триботехнических характеристик конструкционных материалов, в том числе износостойких покрытий.

Сущность приводимых методов испытаний заключается в том, что в одинаковых условиях при соответствующем воздействии абразивных частиц изнашивают исследуемый и эталонный образцы, а относительную износостойкость материала оценивают из сравнения их износов.

Эталонные образцы и контрообразцы для всех методов изготавливают из стали 45 по ГОСТ 1050 после термической обработки. Общими для всех методов являются следующие условия: фиксированное крепление образцов; обеспечение стабильных статических или динамических нагрузок; регламентация времени испытаний. Для всех методов потерю массы или линейный износ определяют прямым взвешиванием или измерениями размеров образца до и после испытаний.

При обработке результатов вычисляют средние арифметические значения потерь массы $g_{\text{э}}$ (г) или средний линейный износ $h_{\text{э}}$ (мм), эталонных образцов и потерь массы g_n (г) или средний линейный износ h_n (мм) испытуемых образцов. Относительную износостойкость (K_g или K_h) исследуемого материала вычисляют по формулам:

$$K_g = \frac{g_{\text{э}} \cdot p_n \cdot N_n}{g_n \cdot p_{\text{э}} \cdot N_{\text{э}}}, \quad K_h = \frac{h_{\text{э}} \cdot N_n}{h_n \cdot N_{\text{э}}}, \quad (4.2)$$

где $p_{\text{э}}$, p_n - плотность эталонного и исследуемого материалов, г/см³;

$N_{\text{э}}$, N_n - число оборотов ротора (ГОСТ 23.201) или количество ударов (ГОСТ 23.207 и ГОСТ 23.212), или путь трения (ГОСТ 17367), или число

оборотов ролика (ГОСТ 23.208) при испытаниях эталонного и исследуемого материалов.

Полученные данные можно использовать, в частности, для расчетов остаточного ресурса, дисперсии остаточного ресурса и вероятности безотказной работы почвообрабатывающих машин (лемехов, отвалов у плугов, зубьев или дисков у борон), режущих частей ножей бульдозеров, открытых передач сельхозтехники, тяжелонагруженных пар трения, работающих в условиях абразивного изнашивания и др.

4.3.2. Изнашивание закрепленными и незакрепленными абразивными частицами

Изнашивание **закрепленными** и незакрепленными абразивными частицами (рис. 4.2) -- весьма сложный процесс, который определяется многими факторами, взаимодействующими друг с другом. Для него характерна малая площадь контакта абразивной частицы с рабочей поверхностью. Это вызывает значительные напряжения, величина которых зависит от формы и механических свойств частицы, а также от прижимающей нагрузки.

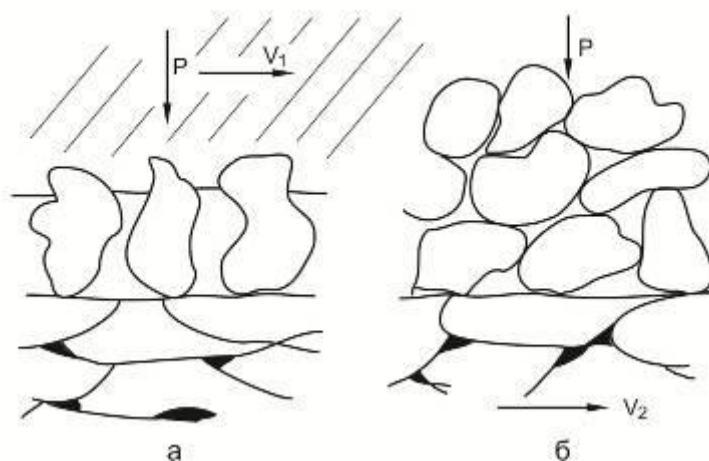


Рис. 4.2 – Схемы взаимодействия закрепленных (а) и незакрепленных (б) абразивных частиц: P - нагрузка; V_1 - скорость перемещения закрепленного абразива; V_2 - скорость перемещения образца.

При этом возможны два случая: если возникающие напряжения превышают предел упругости, но не превышают предела текучести, то происходит усталостное разрушение; если напряжения выше предела текучести, то изнашивание сопровождается пластической деформацией микрообъемов и происходит последеформационное разрушение. Иногда отмечается процесс шаржирования, при котором резко снижается износ за счет уменьшения шероховатости поверхности. Величина износа может принимать даже отрицательные значения, т.е. размеры и масса образца будут увеличиваться. Причиной шаржирования является ударное действие острых абразивных частиц, их дробление и процессы адгезионного характера. Эффект шаржирования зависит от скорости перемещения абразивной массы и соотношения твердости абразива и образца. Он наблюдается только у мягких, пластичных материалов.

Изнашивание в движущейся абразивной массе в основном определяется степенью закрепленности абразивных частиц. Чем она выше, тем вероятнее абразивное разрушение и менее вероятно усталостное.

М.М. Хрущов показал, что при изнашивании о закрепленный абразив (наждачное полотно) соотношение твердостей абразива и испытуемого материала $\frac{H_a}{H_m}$ определяет характер изнашивания и величину износа. При $H_a < H_m$ износ очень мал, либо отсутствует вообще. Если $\frac{H_a}{H_m} \geq 1,4-1,6$, то величина износа постоянна и не зависит от твердости абразива. Изнашивание в этом случае происходит за счет микрорезания.

Исследования износостойкости чистых металлов, структурно однородных цветных сплавов и сталей при трении о твердые зерна, закрепленные на неподвижной поверхности в отсутствие нагрева и агрессивной среды установлено, что относительная износостойкость чистых металлов находится

в линейной зависимости от микротвердости. Опытные точки располагаются на прямой, проходящей через начало координат. Испытаниями баббитов на оловянной, свинцовой и оловянно-свинцовой основах и свинцовистой бронзы с различной микротвердостью разных структурных элементов не установлено определенной зависимости между износостойкостью и микротвердостью. Тем не менее, во всех случаях износостойкость сплавов оказалась меньше, чем чистых металлов той же твердости. Для сталей в термически необработанном состоянии зависимость износостойкости от твердости такая же, как и для чистых металлов. Износостойкость сталей после их закалки и отпуска возрастает с увеличением твердости по линейному закону, но менее интенсивно, чем у чистых металлов и термически необработанных сталей. Испытания показали, что предварительный наклеп не повышает износостойкости чистых металлов и сталей

При определении влияния трещиностойкости различных материалов на износостойкость в широком диапазоне нагрузок выявлена определенная критическая нагрузка, превышение которой вызывает смену механизма изнашивания: микрорезание заменяется хрупким выкрашиванием. Интенсивность изнашивания при нагрузках меньших, чем критическая, определяется только твердостью, а при нагрузках, превышающих критическую, она зависит прежде всего от показателя трещиностойкости K_{IC} . Критическая нагрузка зависит от структуры материала и физико-механических свойств абразива.

Для испытаний на изнашивание при трении о закрепленные частицы абразива могут быть рекомендованы несколько типов установок. Наибольшее распространение при такой схеме являются установки с разной формой поверхности изнашивания. В установке первого типа (рис. 4.3) абразивная шкурка 2 накинута на вращающийся барабан 1. Образец 8

закреплен держателем 7, который соединен с кареткой 5 через тензоэлемент 6 для измерения сил трения. При вращении

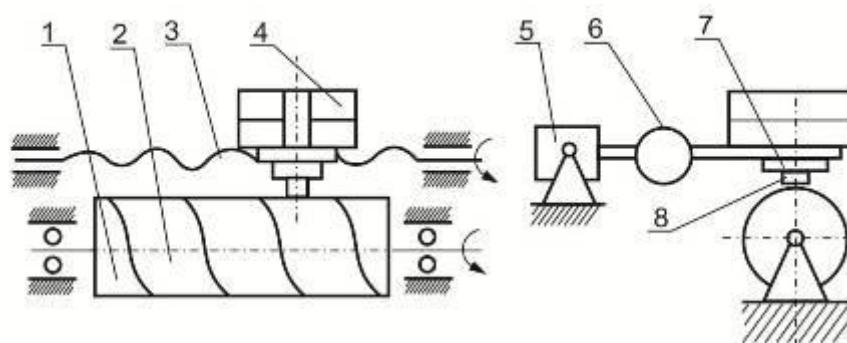


Рис. 4.3 – Схема установки с цилиндрической поверхностью изнашивания: 1 – барабан; 2 – абразивная шкурка; 3 – ходовой винт; 4 – груз; 5 – каретка; 6 – тензоэлемент; 7 – держатель образца; 8 – образец.

ходового винта 3 образец поступательно перемещается вдоль образующей цилиндра. Нормальная сила прижима задается грузом 4.

В установке второго типа (рис. 4.4) основными узлами являются плоский

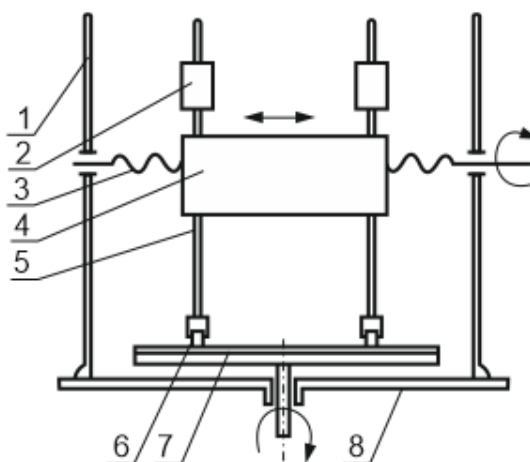


Рис. 4.4 – Схема установки для испытаний на изнашивание закрепленным абразивом: 1 – стойка; 2 – груз; 3 – ходовой винт; 4 – ползун; 5 – держатель образца; 6 – образец; 7 – диск с абразивной шкуркой; 8 – основание.

диск с абразивной шкуркой 7, приводимый в движение двигателем с частотой до 1500 мин^{-1} , и ходовой винт 3 с двумя держателями образцов 5. Во время испытаний образцы 6 прижимаются к диску за счет веса держателей и гирь 2. Относительно диска образцы совершают движение по спирали. Образцы радиально перемещаются ползуном 4 вращением ходового винта 3. Смена направления перемещения осуществляется в автоматическом режиме реверсом вращения винта 3 с помощью концевых выключателей (на схеме не указаны).

Однако при испытании тонких износостойких покрытий эта установка непригодна по следующим причинам. Во-первых, точность результатов даже при испытаниях по стандартной схеме невысока. Во-вторых, при помощи держателей-захватов не удастся точно выставить цилиндрические образцы. Незначительные перекосы образцов, не столь уж важные при исследовании объемно-упрочненных материалов делают испытания некорректными при изучении тонких покрытий (одновременно изнашиваются и покрытие, и основной металл). В-третьих, даже при минимально возможных нагрузках (без гирь) износ слишком велик вследствие веса образцов, штоков и держателей, прижимающих покрытие к абразиву. В-четвертых, большие скорости вращения диска и перемещения винта с держателями образцов приводят к уменьшению времени между последовательными взвешиваниями до нескольких секунд (уменьшению точности результатов), а увеличивать интервал невозможно из-за малой толщины покрытия и опасности полного его изнашивания. Поэтому специально для изучения изнашивания тонких покрытий предлагаются новые методики, разрабатываются новые установки.

Одна из них (рис.4.5) выполнена в виде специального приспособления, устанавливаемого в резцедержатель токарного станка.

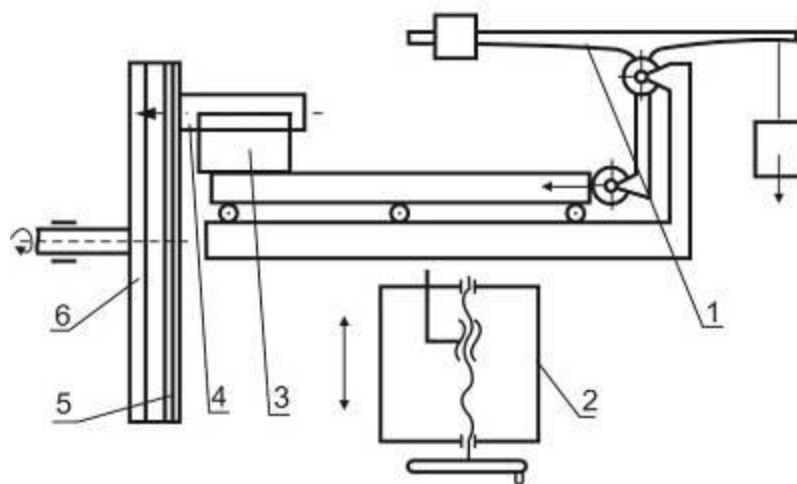


Рис.4.5 – Схема установки для испытаний тонких покрытий на изнашивание закрепленным абразивом.

Образец 4 устанавливают в призматическом держателе 3, который не допускает перекосов образца. Горизонтальная схема размещения позволяет полностью исключить влияние собственного веса образца и держателя на усилие прижима к абразивной шкурке 5. Скорость относительного перемещения образца и наждачной бумаги устанавливается в широких пределах изменением частоты вращения шпинделя станка 6 и поперечной подачи суппорта 2 с резцедержателем. Минимальное усилие прижима образцов с учетом рычажной системы 1 соответствует 5 г.

Испытания плазменных покрытий системы никель – алюминий, никель - титан и из самофлюсующихся сплавов на установке (см. [рис. 4.4](#)) показали, что их износостойкость прямо пропорциональна твердости. Максимальная стойкость покрытия соответствует температурам оплавления, при которых образуется структура, обладающая самой большой твердостью. В экспериментах на изнашивание покрытий не были достигнуты условия интенсивного хрупкого выкрашивания поверхностных слоев. Износостойкость исследованных покрытий превышала износостойкость стали 45 (HV 190) в 1,5-8 раз. Наименьшую скорость изнашивания имели оплавленные самофлюсующиеся покрытия с добавками карбида хрома.

Ниже, в качестве примера показана смена механизма изнашивания при уменьшении нагрузки. На установке (см. **рис. 4.5**) изучали тонкие (20—30 мкм) хромистые покрытия с различным содержанием сфероподобных алмазных частиц. Толщина покрытия 20-30 мкм, диаметр алмазных сфер до 3 мкм, Твердость, в зависимости от технологии нанесения, была разной: первый вариант технологии - HV1650. второй - HV1300. Большие нагрузки (240 г) выявляют преимущества второго варианта в сравнении с первым (рис.8.7). Скорость изнашивания при этом была соответственно 0,167 и 0,229 мг/с. Однако с уменьшением нагрузки до 140 г разница исчезает. При усилии прижима 20 г более износостойким является покрытие первого варианта технологии, скорость изнашивания которого в 2,3 раза меньше, чему второго (0,276 и 0,0686 мг/с соответственно). Вероятно, с ростом нагрузки свыше критической происходит смена механизма изнашивания: вязкого на хрупкий.

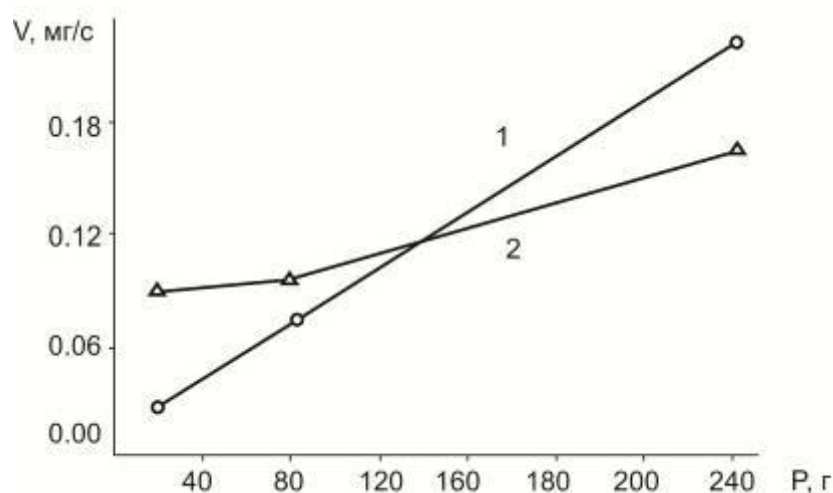


Рис. 4.6 – Влияние нагрузки на скорость изнашивания хромистых покрытий различной твёрдости: 1 – HV1650; 2 – HV1300.

При нагрузках на закрепленный абразив меньших критической, для повышения износостойкости материала могут быть использованы все дислокационные механизмы упрочнения. Предпочтительны зернистые мелкодисперсные структуры, большое значение имеет высокая прочность фаз и межфазных границ. Следует стремиться к получению более

однородной микроструктуры вдоль направления движения абразива. Это уменьшает концентрацию напряжений, возникающую на межфазных границах, и, следовательно, вероятность локального хрупкого разрушения. В случае превышения критической нагрузки разрушение поверхности контролируется характеристиками трещиностойкости. При этом повышение износостойкости может быть достигнуто упрочнением за счет диспергирования всех структурных составляющих и созданием субструктуры. Одновременно следует предотвращать возникновение напряжений третьего рода за счет дислокаций «леса» и пересыщения твёрдых растворов.

Изнашивание нежёстко закреплёнными абразивными частицами происходит вследствие перемещения поверхности детали сквозь массу абразивных частиц. Наиболее точно этот процесс моделируется движением испытуемой детали в резервуаре, заполненном абразивом. В реальных условиях процесса изнашивания закрепленные и незакрепленные абразивные частицы сопутствуют друг - другу.

Существенным является влияние на износостойкость формы абразивных частиц. Так, при переходе от корундового абразива, имеющего оскольчатую форму, к кварцевой сферической износостойкость нормализованной стали 25 увеличивается на порядок. При изнашивании металлов нежёстко закрепленным корундом зависимость относительной износостойкости и твердости HV имеет нелинейный характер. Если в качестве абразива используется кварцевый песок, то относительная износостойкость K_n выражается формулой:

$$K_n = a(HV)^b, \quad (4.3)$$

где a и b - коэффициенты.

Зависимость износа материалов (И) от нагрузки при изнашивании имеет также степенный характер:

$$I=kp^n, \quad (4.4)$$

где k и n – коэффициенты.

Чем больше в процессе изнашивания доля пластической деформации, тем больше n , а с увеличением доли усталостного разрушения величина n стремится к 1.

Высокая износостойкость в среде нежестко закрепленного абразива требуется для многочисленных рабочих органов карьерных, строительных и дорожных машин. Интенсивно изнашиваются зубья ковшей и роторов экскаваторов, бульдозерные отвалы, детали грейдеров, траков машин на гусеничном ходу, ковшей земснарядов, бурильных установок, трубопроводов для перемещения сыпучих тел, почвообрабатывающего инструмента (диски лушпильников, лапы культиваторов, лемеха плугов и др.).

Все варианты машин для определения сопротивления изнашиванию о нежестко закрепленный абразив на пластинчатых образцах можно объединить в три схемы (рис.4.7).

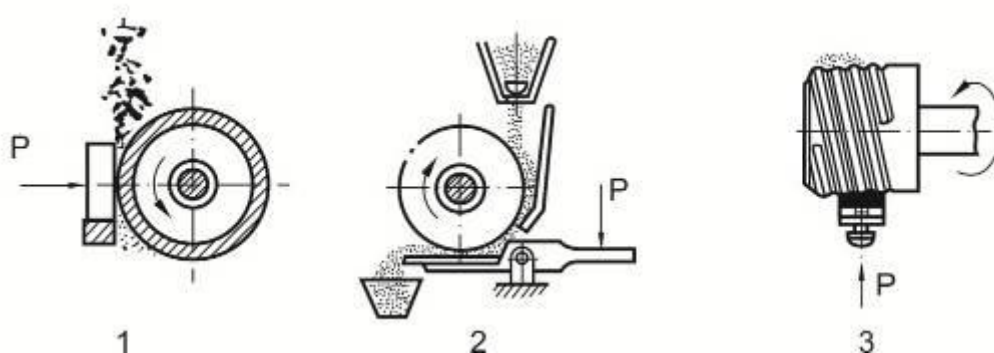


Рис. 4.7 - Схемы установок для испытаний материалов на изнашивание нежестко закреплёнными частицами по методу: 1 – Бринелля; 2 – Тененбаума; 3 – винтовому

Наибольшее распространение получила схема Бринелля (рис.4.8), при испытании по которой, к вращающемуся рубчатому резиновому ролику диаметром 220 мм и шириной 12 мм прижимается своей плоской стороной образец.

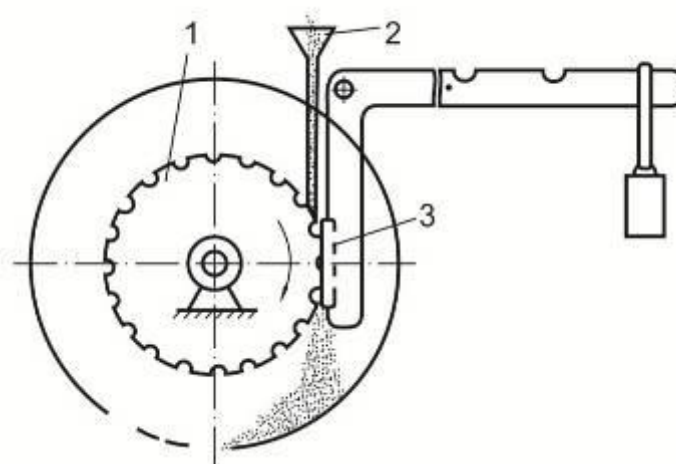


Рис. 4.8 - Узел нагружения на установке Бринелля: 1 - резиновый ролик; 2 - абразивный материал; 3 - образец.

Из бункера через воронку и трубочку с калиброванным отверстием подается кварцевый песок с размером частиц 0,2 -- 0,6 мм. Абразив захватывается роликом (с радиусом углублений па поверхности - 4 мм, число углублений - 20) и протаскивается на поверхности образца со скоростью скольжения 2,29 м/с и нагрузке 147 Н. В США аналогичная схема регламентируется стандартом ASTM G 65.

Г.М.Сорокин (ведущий специалист по методам испытаний материалов на абразивное изнашивание) рекомендует установку, в которой используются цилиндрические образцы. Установка (рис.4.9) создана для испытания материалов на изнашивание в массе сухого или увлажненного абразива различной твердости, крупности и минералогических особенностей.

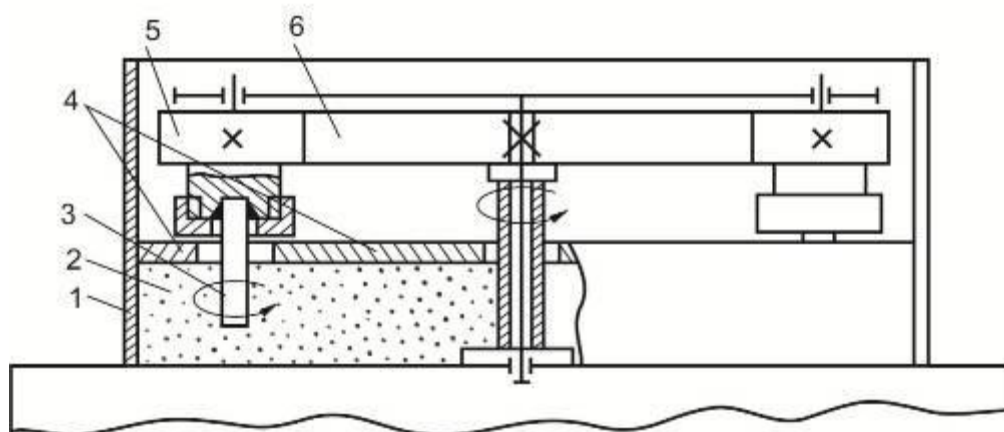


Рис. 4.9 - Схема установки для испытаний материалов в абразивной массе: 1 – корпус; 2 – абразивная масса; 3 – образец ($d=10$ мм, $l=70$ мм); 4 – уплотняющие кольца; 5 – шестерня шпинделя; 6 – неподвижное колесо (водило)

На ней одновременно можно испытывать три образца, причем каждый образец вращается вокруг собственной оси и оси водила, что обеспечивает его равномерное изнашивание. В чашу с абразивом можно вводить коррозионные добавки и тем самым обеспечить условие коррозионно-механического изнашивания.

Схема Тененбаума стандартизирована (ГОСТ 23.208) размеры образца (мм) $30 \times 30(50) \times 5$; резинового ролика: диаметр 48-50 мм, ширина 15 мм. Образец прижимается к ролику с усилием $44,1 \pm 0,25$ Н. Стандарт не распространяется на покрытия твердостью более HV1400 и на пористые материалы со средним размером пор более 0,1 мм. Эти условия ограничивают применимость стандарта для испытаний твёрдых тонких износостойких покрытий. Кроме того, устройство для подачи абразивных частиц в зону фрикционного контакта несовершенно и не обеспечивает постоянной и равномерной подачи абразива. Частично эти недостатки устранены в установке, схема которой показана на [рис. 4.10](#).

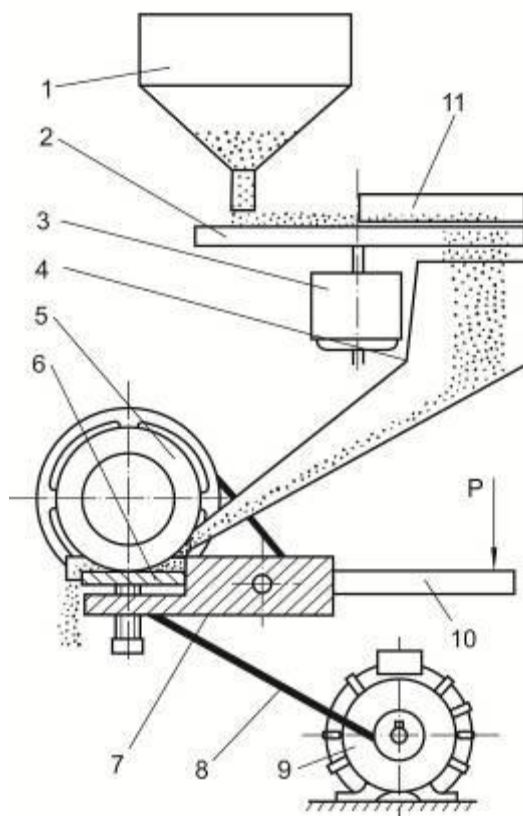


Рис. 4.10 - Схема установки для испытаний на изнашивание нежесткозакреплёнными абразивными частицами: 1 – бункер; 2 – диск дозатора; 3, 9 – электродвигатели; 4 – лоток; 5 – резиновый ролик; 6 – образец; 7 – держатель; 8 – ременная передача; 10 – рычаг; 11 – отсекающий абразива

С целью равномерного поступления абразива в зону контакта используется дозирующее устройство, состоящее из бункера 1 типа воронки, нижняя часть которой находится на определенном расстоянии от медленно вращающегося диска 2. Изменяя величину зазора между воронкой и диском, регулируют расход абразива. Отсекатель 11, находящийся на некотором расстоянии от бункера, отправляет абразив в лоток 4, нижняя часть которого находится у зоны контакта резинового ролика 5 с образцом 6.

Другой особенностью установки по сравнению со стандартной является возможность изменения усилия прижима образца к ролику. Это изменяет степень закрепления абразивных частиц - главный параметр, отличающий данный вид изнашивания от изнашивания закрепленными

абразивными частицами. Он определяет, будет ли частица поступательно перемещаться, осуществляя пластическую деформацию поверхностных слоев, или перекашиваться, вызывая разрушение усталостной природы от высоких контактных нагрузок.

Для сравнительных испытаний в качестве абразива используют электрокорунд. При оценке износостойкости в конкретных условиях изнашивания следует использовать абразивный материал, соответствующий материалу, воздействию при эксплуатации, но с размером зерен не более 1,0 мм.

Перед испытаниями резиновый ролик прирабатывают трением его о поверхность шлифовальной шкурки, закрепленной на плоской пластине, до полного прилегания.

Образцы промывают, просушивают, устанавливают в держатель и прижимают к ролику с выбранным усилием. Добиваются равномерной непрерывной подачи абразивного материала в зону трения, что контролируют по наличию частиц по всей длине ролика.

При стандартных испытаниях частота вращения ролика 60 ± 2 мин⁻¹, фиксированное усилие прижима $44,1 \pm 0,25$ Н, количество оборотов при испытании эталонной пластины – 600 (при твердости образца до HV 400). При увеличении твёрдости до HV400-800 количество оборотов увеличивают до 1800; при HV > 800 число оборотов ролика -- 3600.

Как отмечалось выше, если при трении возникающие в месте контакта напряжения превышают предел текучести, то изнашивание сопровождается пластической деформацией микрообъемов, наклепом и разрушением. В противном случае происходит усталостное разрушение за счет накопления микродефектов и роста трещин.

У газотермических износостойких покрытий высокоскоростное охлаждение формирующих их частиц может приводить к образованию метастабильных пересыщенных растворов. Вследствие низкой

трещиностойкости такая структура будет разрушаться при усталостном механизме изнашивания. Пересыщенность твердых растворов уменьшают выдержкой при высокой температуре (отжигом) или оплавлением сплава и кристаллизацией в равновесных условиях.

Как указывалось выше интересным эффектом, приводящим к повышению стойкости при изнашивании нежестко закрепленными абразивными частицами, является шаржирование. Оно возможно при сильно шероховатой или пористой поверхности, когда размеры неровностей соизмеримы с величиной абразивных частиц. В этом случае создается макрогетерогенная структура. Закрепившиеся в порах или трещинах поверхности абразивные частицы упрочняют поверхность, в определённой степени препятствуя изнашиванию.

Оптимальной в условиях изнашивания закреплёнными и незакреплёнными частицами абразива является гетерогенная структура, созданная по принципу Шарпи: твердые включения в пластичной матрице. Решающую роль играют размеры включений, расстояние между ними, механические свойства матрицы. В конструкционных сплавах и покрытиях роль упрочняющих фаз обычно выполняют карбиды, бориды, другие химические соединения большой твердости. Матрица должна упрочняться в такой степени, чтобы не снижалась значительно трещиностойкость. Предпочтительными механизмами торможения дислокаций в матрице являются границы зёрен и субзёрен, дисперсные фазы. При изнашивании незакрепленным абразивом следует избегать сильного твёрдорастворного упрочнения матрицы.

Достаточно широко для упрочнения и восстановления деталей применяется электродуговая наплавка сплавами, образующими при кристаллизации первичные карбиды и другие соединения. Наиболее распространены карбиды хрома, вольфрама, ванадия, молибдена, титана и ниобия. Высокие показатели износостойкости в сочетании с

трещиностойкостью получают при наплавке электродами, образующими нестабильные аустенитно-карбидные и аустенитно-мартенситные структуры. Для изделий небольших габаритов, сложной формы, а также для местного упрочнения рабочих поверхностей таких деталей, как пресс-формы, шнеки, детали мешалок и смесителей эффективно использование лазерной наплавки. В результате воздействия высококонцентрированной энергии получают наплавку со строением аустенитно-мартенситной матрицы с равномерно распределенными, дисперсными карбоборидами.

Необходимые структуры и оптимальные технологии для рассмотренных выше вариантов изнашивания показаны на **рис. 4.11, 4.12** (по А. О. Токареву).

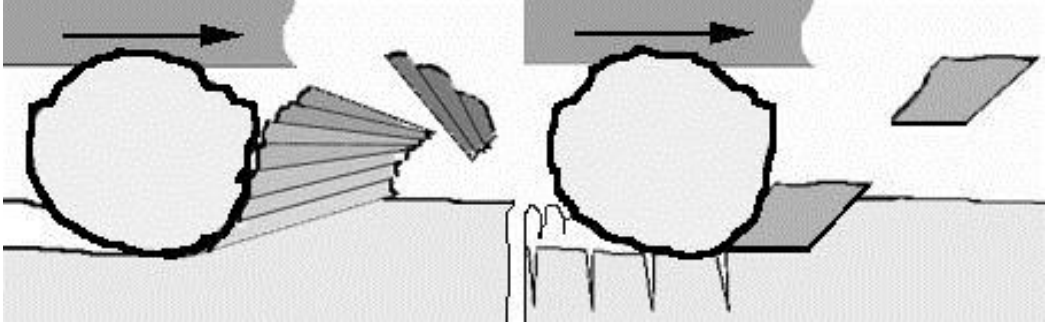
Закрепленный абразив (ГОСТ 17367)	
	
Высокая трещиностойкость	Высокая твердость
Требуемая структура	Способ нанесения покрытия и его обработки
Однородная мелкозернистая тонкодисперсная структура Направленно – кристаллизованные эвтектические сплавы	Газотермическое напыление с оплавлением или без него
Весьма тонкодисперсная карбоборидная фаза в Ni-Cr твердом растворе	Индукционное припекание Ni-Cr самофлюсующегося сплава
Композиции самофлюсующихся сплавов с дисперсными тугоплавкими добавками	Плазменное напыление и оплавление
	Детонационное напыление
Дозвтектические, эвтектические Fe-Cr-B-C сплавы	Электродуговая наплавка

Рис. 4.11 – Требуемые структуры и рекомендуемые технологии нанесения покрытий для повышения износостойкости при трении о закреплённый абразив

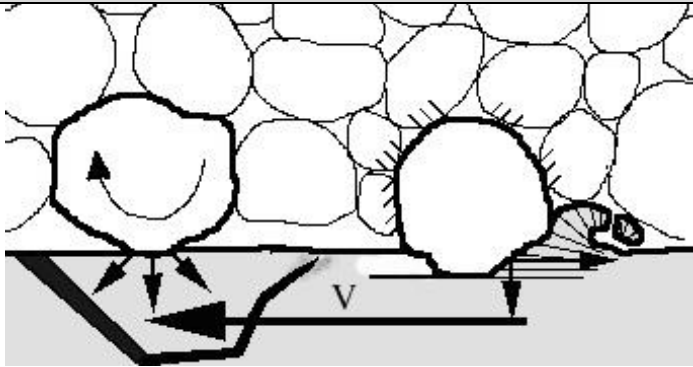
Нежестко закреплённый абразив (ГОСТ 23.208)	
	
Требуемая структура	Способ нанесения покрытия и его обработки
Нестабильные аустенито-карбидные и аустенито-мартенситные сплавы	Электродуговая наплавка
Первичные карбиды в карбидной эвтектике	
Дисперсные карбиды в твердом растворе	Газотермическое напыление и оплавление самофлюсующихся сплавов
Весьма дисперсные карбиды в твердом растворе	Плазменное напыление самофлюсующихся сплавов с последующим оплавлением лазером
Аустенитно-мартенситная матрица с равномерно распределенными армирующими частицами карбидов	Лазерное поверхностное легирование

Рис. 4.12 - Требуемые структуры и рекомендуемые технологии нанесения покрытий для повышения износостойкости при трении о нежестко закреплённый абразив

4.3.3. Газоабразивное изнашивание

Газоабразивное изнашивание является результатом воздействия твердых частиц, взвешенных в газе и перемещающихся относительно изнашивающегося тела. В результате газоабразивного изнашивания разрушаются лопатки газовых турбин, детали оборудования электростанций, работающих на твердом топливе, стволы пескометов, многие детали газопроводного и газонасосного оборудования.

Изнашивание абразивными частицами в потоке газа является сложным процессом, зависящим не только от физико-механических свойств материала. Износ зависит от угла атаки, скорости абразивных частиц в момент удара о поверхность детали, отношения значений твердости изнашиваемого материала и абразива, концентрации абразивных частиц и т.д.

Различают два случая взаимодействия потока абразивных частиц с материалами: удар прямой (угол атаки $\alpha = 90^\circ$) и косой удар (угол атаки $0 < \alpha < 90^\circ$), рис. 4.13.

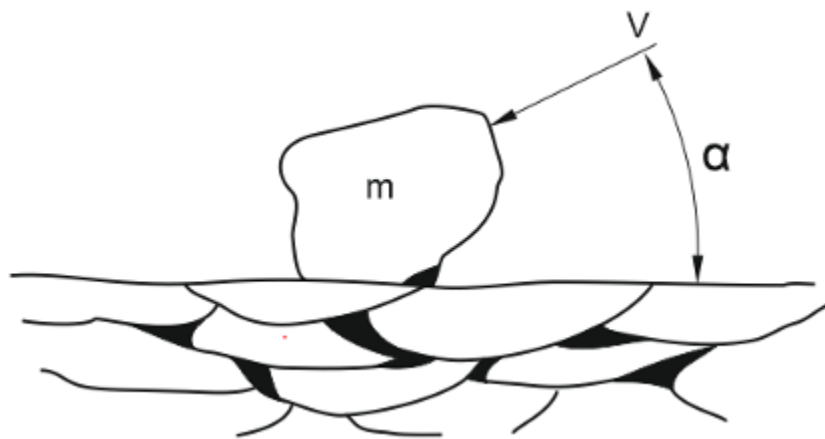


Рис. 4.13 – Взаимодействие абразивных частиц с поверхностью при газоабразивном изнашивании: m —масса частицы; V —скорость частицы; α -- угол атаки

В первом случае в зависимости от физико-механических свойств материалов и интенсивности воздействия возможны упругая деформация,

пластическая деформация, перенаклеп с развитием трещин и отделением отдельных чешуек. Динамический характер нагружения повышает вероятность хрупкого или усталостного разрушения материала.

Поскольку энергия удара отдельной абразивной частицы невелика, то высокую стойкость при углах атаки 90° имеют эластичные материалы (например, резина), способные упруго деформируясь снижать напряженность в пятне контакта и демпфировать энергию удара.

При косом ударе на характер повреждения поверхности сильно влияет касательная составляющая импульса и сопротивление материала воздействию касательных к поверхности напряжений. С уменьшением угла атаки доминирующим становится резание абразивными частицами. Разрушение в этом случае напоминает изнашивание нежестко закрепленными абразивными частицами.

Однако газоабразивное изнашивание является более сложным процессом, чем изнашивание о закрепленный или незакрепленный абразив. Это связано, прежде всего, с важностью роли угла атаки. Г.М.Сорокин полагает, что ни одна из известных механических характеристик не является критерием износостойкости при изменении угла атаки и скорости полета частиц.

В настоящее время нет единого мнения о влиянии размера и массы абразивных частиц на скорость изнашивания. Одной из причин противоречивости данных является отсутствие учета во время испытаний значительного отставания периферийных частиц от базового потока. Частицы отстают от потока тем больше, чем больше их масса и размер. Повышение концентрации абразива в потоке приводит к монотонному увеличению скорости изнашивания до определенного предела и при больших концентрациях снижается из-за экранирующего действия отскакивающих частиц.

Оценить износостойкость упрочненной поверхности в абразивном потоке без проведения соответствующих экспериментов невозможно. Поэтому используют стандартный метод испытаний, основанный на одновременном воздействии на испытуемые и эталонные образцы газоабразивного потока при фиксированных режимах испытаний (ГОСТ 23.201).

Эталонные образцы - пластины 20x15x4 мм изготавливают с шероховатостью рабочей поверхности $R_z = 0,16 - 0,32 \text{ мкм}$ без острых кромок. В качестве стандартного эталонного материала выбрана сталь 45 в отожженном состоянии с твердостью HV 185 - 195. Стандарт не распространяется на материалы и покрытия твердостью менее HV 20, на пористые материалы со средним размером пор более 0,02мм, а также на покрытия толщиной менее 0,3мм.

Оборудование для испытаний материалов на газоабразивное изнашивание можно разделить на три группы: со свободным падением абразивных частиц, с ускорением их газовым потоком и с механическим ускорением абразивного материала (рис.4.14).

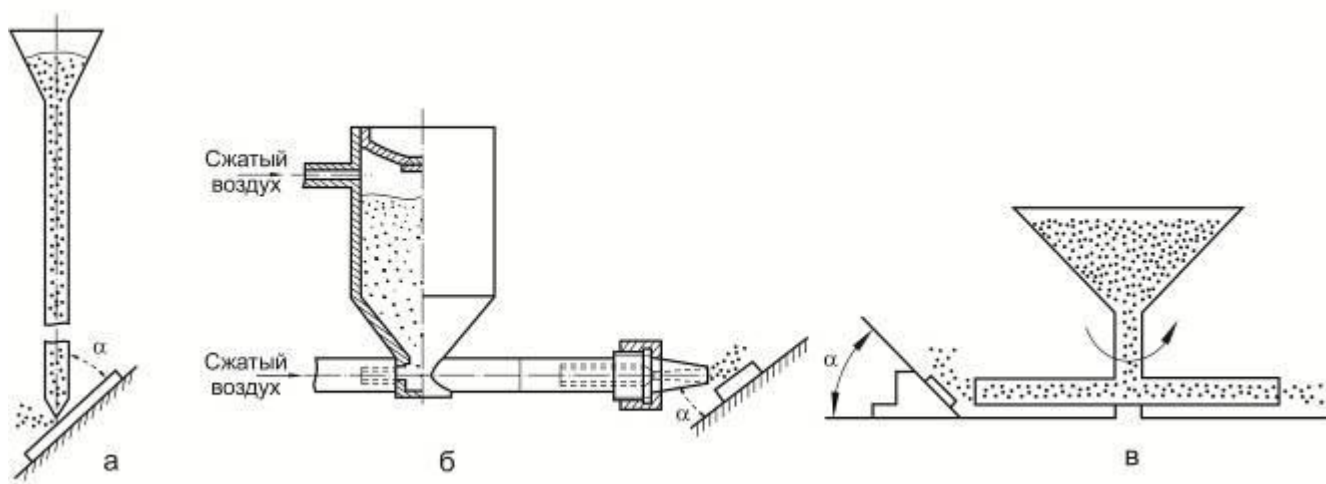


Рис. 4.14 – Схемы установок для испытания материалов на газоабразивное изнашивание (α - угол атаки): а – со свободным падением абразива; б – с ускорением абразивных частиц потоком газов; в – с механическим ускорением абразива.

Установки со свободным падением абразива в воздушной среде имеют ограниченное применение, так как могут быть использованы только при низких скоростях соударения. В вакуумных установках скорость соударения достигает от 1,9 до 8,5 м/с. Устройства с пневматической подачей бывают инжекционными и нагнетательными (последнее на схеме). Инжекционные установки не обеспечивают абразивным частицам высоких скоростей и применяются реже. В нагнетательных устройствах кроме воздействия абразивных частиц можно оценивать также влияние агрессивной среды и температуры на износостойкость.

В установках с механическим ускорением частиц абразивные зерна ускоряются центробежными силами. Средой движения частиц могут быть газы и вакуум. Такие установки применяют достаточно часто. Имеется пять модификаций подобного вида установок, различающихся диаметром ротора (40 -600мм), диапазоном скоростей ротора (15 – 350 м/с), регулированием скоростей вращения (ступенчатое, плавное), возможностью вакуумирования.

Типично для этой группы устройство с центробежными ускорителями струи. В этой установке соударение абразивной смеси с образцами регулируется в широких пределах, что позволяет одновременно испытывать несколько образцов под различными узлами атаки. Кроме того, установка проста в исполнении и обслуживании. Аналогичные испытания в США устанавливает стандарт ASTM G 76.

Установка (рис.4.15) состоит из бункера дозатора 2 с абразивной массой и ротора 4 с четырьмя каналами для выхода абразивных струй. Из бункера при открытой заслонке 3 абразив поступает в каналы ротора, вращающегося с заданной угловой скоростью от электродвигателя 5, соединенного с датчиком частоты вращения 6. Под действием центробежных сил струя абразива вылетает из канала ротора и ударяется об образцы исследуемого и эталонного материалов. Образцы установлены в держателях под углом атаки α , регулируемом наклоном рабочей поверхности

относительно горизонтали в пределах 15-90°. Одновременно испытывают при одинаковых углах атаки не менее шести образцов (три испытательных и три эталонных). Регулированием частоты вращения обеспечивают скорость соударения потока абразива 38 – 76 м/с. Отработанный абразив попадает в бункер, из которого его отсасывают пылесосом. Предусмотрена плавная регулировка скорости вращения ротора. Установка стандартизирована (ГОСТ 23.201).

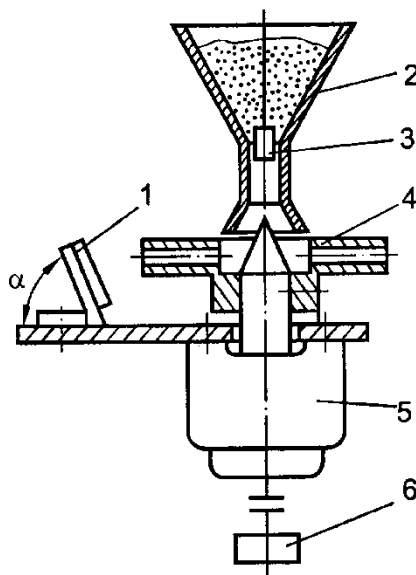


Рис. 4.15 – Схема установки для газоабразивного изнашивания по ГОСТ 23.201: 1 – образец; 2 – бункер-дозатор; 3 -- заслонка; 4 – ротор; 5 – электродвигатель; 6 – датчик частоты вращения/

Абразивный материал - кварцевый песок с размером зерен 0,5 - 0,9мм и с относительным содержанием влаги не более 0,15%. Стандарт допускает использовать абразивный материал, соответствующий материалу, воздействию при эксплуатации. Условия испытаний на стандартной установке приведены в таблице 4.3.

Табл. 4.3 - Условия испытаний

Размеры образца, мм	20x15x4
Частота вращения ротора, мин ⁻¹	3000 и 6000
Максимальное количество испытываемых образцов, шт	15
Расстояние от центра рабочей поверхности образца до оси ротора, мм	118±1

Сечение канала, мм	3x7
Длина канала, мм	82±0,4
Диаметр выходного канала бункера, мм	6±0,2
Угол конусности бункера, град.	90
Углы атаки, град.	15, 30, 60, 90

Стандартная методика на газоабразивное изнашивание имеет следующие недостатки. Во-первых, количество абразива, воздействующего на изнашиваемую поверхность, рассчитывается, а не определяется непосредственно. Это вносит систематическую погрешность в определяемые величины относительной износостойкости и скорости изнашивания. Во-вторых, струя абразива неоднородна по сечению, что усугубляет погрешность результатов, особенно при изнашивании особо тонких покрытий.

Г.И. Виницкая с сотрудниками разработали и изготовили установку, в которой эти недостатки устранены. Для обеспечения однородного поля изнашивания в конструкцию введен дополнительный узел, обеспечивающий сканирование ротора вдоль оси вращения. Для выделения части струи с наиболее равномерным потоком частиц между ротором и образцом устанавливается диафрагма. Для определения количества абразива, воздействовавшего на образец, установлены специальные сборники.

Испытания обычно проводят при комнатной температуре, но известны эксперименты при низких температурах (125–136 К) и высокотемпературные. В ряде случаев газовый поток имеет не только повышенную температуру, но и содержит агрессивные компоненты, что усложняет условия изнашивания. Среди установок, применяемых для испытаний в таких условиях, заслуживает внимание устройство, в котором воспроизводятся основные условия работы материала лопаток газовой турбины: температура, напряженное состояние и воздействие горячим газовым потоком, несущим абразивные частицы. Образцами являются лопатки, которые могут быть разной длины.

При стандартных испытаниях на центробежном ускорителе образцы прирабатывают перед испытанием. Необходимо обеспечить ширину участка рабочей поверхности образца, открытую воздействию абразивного материала, -- $2 \pm 0,1$ мм. Перед испытаниями устанавливают частоту вращения ротора (n) 3000 или 6000 об/мин. обеспечивающую скорость потока частиц абразива 38 или 76 м/с (V). Эти величины связаны соотношением $n = 78,2V$.

Разрушению поверхностного слоя при газоабразивном изнашивании предшествуют высокие контактные удельные нагрузки динамического характера. В таких условиях повышение твердости материала эффективно лишь до некоторого критического значения. Вследствие роста предела текучести и падения трещиностойкости при изнашивании будет возрастать доля хрупкого разрушения. Поэтому необходимо получать максимально гомогенную или ультрадисперсную структуру. Удары частиц должны восприниматься равномерно распределенными упрочняющими фазами. Матрица вязкого твердого раствора должна пластически деформироваться под воздействием абразивных частиц, предохраняя твердую фазу от разрушения. В этом случае для упрочнения рационально применять самофлюсующиеся сплавы со структурой никель-хромовых растворов с измельченными равномерно распределенными сложными карбидами. Высокую износостойкость обеспечивают также нестабильные аустенито-карбидные и аустенито-мартенситные сплавы. При малых углах атаки требования к структуре износостойкой поверхности совпадают с предъявляемыми к сплавам, работающим в среде закрепленного абразива. Увеличения износостойкости самофлюсующихся сплавов добиваются упрочнением их тугоплавкими дисперсными добавками. Необходимые структуры и оптимальные технологии повышения износостойкости в газоабразивном потоке приведены на **рис. 4.16** (по А. О. Токареву).

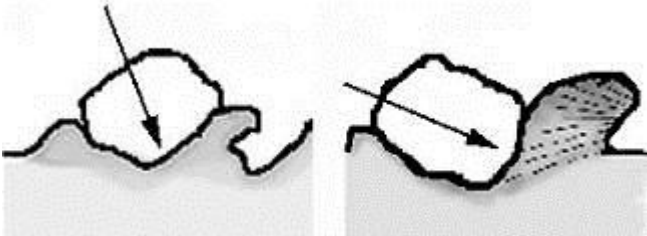
Абразив в потоке газа или жидкости (ГОСТ 23.201)	
	
Требуемая структура	Способ нанесения износостойкого покрытия и его обработки
Твёрдый никель-хромовый раствор с измельчёнными равномерно распределёнными сложными карбидами	Лазерная наплавка
	Газотермическое напыление с оплавлением электронным лучом
	Оплавленные газотермические покрытия
Композиции самофлюсующихся сплавов с тугоплавкими дисперсными добавками	Плазменное напыление и оплавление
	Детонационное напыление
	Лазерная наплавка
Нестабильные аустенито-карбидные и аустенито-мартенситные сплавы	Плазменная наплавка
	Электродуговая наплавка
Первичные карбиды в тонкой эвтектике	Электродуговая наплавка

Рис. 4.16 – Требуемые структуры и рекомендуемые технологии нанесения покрытий для повышения износостойкости при газоабразивном изнашивании

4.3.4. Гидроабразивное изнашивание. Кавитация

Гидроабразивному изнашиванию подвергаются диафрагмы и рабочие колеса насосов, детали землесосов, лопасти и камеры гидротурбин, различные детали насосного и трубопроводного оборудования.

Гидроабразивное изнашивание является сложным, самонастраивающимся процессом, зависящим, прежде всего от угла атаки, скорости абразивных частиц в момент удара о поверхность детали, отношения значений твердости изнашиваемого материала и абразива, концентрации абразивных частиц в жидкости. Этот процесс определяется не только действием абразивных частиц, но и физико-химическими реакциями с жидкостью. При определенных условиях воздействие жидкости может быть столь активным, что изнашивание может быть подавлено кавитацией или коррозией. Обычно такому разрушению предшествует пластическая деформация, микроусталостные явления или процессы микрорезания, на которые накладываются гидравлические удары захлопывающихся кавитационных пузырьков и адсорбционно-коррозионные реакции.

Систематические исследования позволили сформулировать научный подход к проблеме выбора материала и определить влияние и взаимодействие внешних факторов, обуславливающих гидроабразивный износ.

При собственно гидроабразивном изнашивании наиболее важным фактором является угол атаки α . Среди материалов, подвергнутых разнообразным упрочняющим обработкам (испытано более 80 разновидностей конструкционных материалов), лишь винипласт оказался малочувствительным к изменению угла атаки. Очень заметно влияние угла атаки на износ сталей и чугунов; максимальный износ соответствует α от 18 до 60°. Особенно сильно зависит от α износ прочных, но хрупких

минералокерамик и твердых сплавов: изменение угла атаки с 10 до 70° увеличивает скорость изнашивания в 1,5-8 раз.

Износ и скорость удара абразивных частиц связаны степенной зависимостью, в которой показатель степени скорости частиц колеблется от 1,5 до 4, и определяется физико-механическими свойствами изнашиваемого материала.

Как и при газоабразивном изнашивании, твердость влияет на износ двояко: увеличение ее сопровождается повышением износостойкости при вязком разрушении и снижением при хрупком. Величина износа зависит не только от абсолютных значений твердости изнашиваемой поверхности, но и от соотношения твердости абразива и детали.

Поскольку на гидроабразивное изнашивание влияют разнообразные факторы, и в настоящее время нет теории разрушения при этом сложном процессе, то корректная оценка износа реальных материалов и ресурсные испытания должны проводиться в условиях, максимально имитирующих эксплуатационные. М.М. Тененбаум и Э.Л. Аронов разработали две машины, удовлетворяющие этим требованиям. Установка для изнашивания в постоянном объеме суспензии (рис.4.17,а) предназначена для испытаний в химически активных жидкостях.

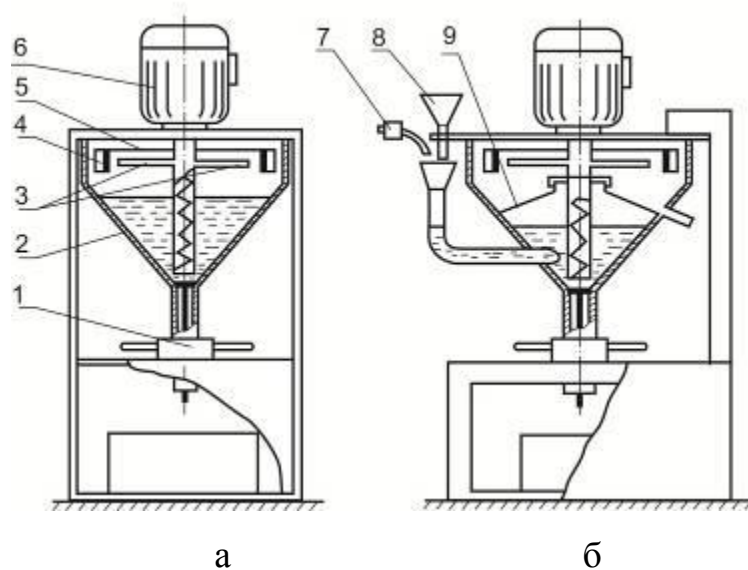


Рис. 4.17 – Установка для испытаний на гидроабразивное изнашивание в постоянном объеме суспензии (а) и в проточной жидкости с обновляемым абразивом (б): 1 - подъемный механизм; 2 - бак; 3 - патрубок; 4 - образец; 5 - ротор; 6 - электродвигатель; 7 - кран; 8 - дозатор; 9 - перегородка.

Из бака 2 суспензия при помощи проволоочной спирали, вращаемой электродвигателем 6, подается к патрубкам 3, на концах которых установлены калиброванные твердосплавные сопла. Суспензия непрерывно выбрасывается через сопла и под заданным углом атаки взаимодействует с поверхностью испытуемого образца 4, закрепленного на роторе 5. Можно опускать бак для установки образцов. Количество жидкости, заливаемой в бак - 9 л., образцы имеют форму пластин размером 30x20x4 мм.

Другая разновидность установки (рис.4.17, б) используется для исследований в проточной жидкости. Бак разделен на два отсека. Абразив и жидкость поступают через дозатор 8 и кран 7. После выбрасывания из сопла жидкость стекает по перегородке 9 и удаляется.

Проведенные Н.А. Клинской-Руденской исследования процесса изнашивания сплава, армированного твердыми дисперсными частицами при гидроабразивном воздействии, показали, что при воздействии потока абразивных частиц под углом 30° изнашивание происходит по механизму микрорезания. При этом износостойкость в зависимости от количества дисперсных частиц в сплаве изменяется немонотонно. Вначале при увеличении частиц износостойкость растет. При превышении количества твердых частиц более оптимального запас вязкости основы становится недостаточным. Происходит хрупкое растрескивание твердых частиц и их выкрашивание. С увеличением угла атаки до 75° износостойкость монотонно убывает с ростом содержания твердой фазы. Твердые включения, помимо усталостного разрушения могут быть выбиты целиком из-за слабого сцепления с окружающей их основой.

ГОСТ 23.219 устанавливает метод испытаний стойкости материалов к гидроэрозионному изнашиванию при соударении с жидкими частицами. Сущность метода заключается в изнашивании вращающихся образцов в результате соударения с потоком жидких частиц, создаваемых специальным генератором. Диаметры капель назначают в соответствии с условиями эксплуатации изделия при среднем диаметре $d_k = (1 \pm 0,5)$ мм.

Для испытания используют не менее 4 образцов при каждом режиме изнашивания. По результатам определения массы и линейных размеров образцов вычисляют их плотность (или кажущуюся плотность для пористых материалов) по ГОСТ 15130.

Испытуемые образцы устанавливают на роторе и закрепляют в держателях так, чтобы рабочие поверхности образцов лежали в плоскости, проходящей через ось вращения ротора, а центр масс располагался возможно ближе к продольной центральной оси коромысла.

Установка для проведения испытаний (рис 4.18) состоит из вакуумной камеры 1, ротора 2, с образцами 5, генератора частиц 3 и бака с рабочей жидкостью 4.

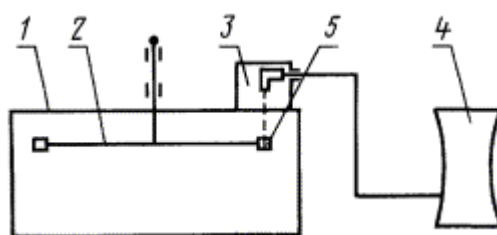


Рис. 4.18 – Установка для проведения испытаний на стойкость к гидроэрозионному изнашиванию по ГОСТ 23.219-84: 1- вакуумная камера, 2- ротор, 3-генератор частиц, 4- бак с рабочей жидкостью, 5-образцы

Герметизируют рабочую камеру установки и создают в ней давление. Температуру подаваемой воды поддерживают в диапазоне (288 ± 5) К. Устанавливают режим работы генератора жидких частиц (капель). Линейная скорость соударения регламентируется технической документацией на изделие и материал. После достижения заданной частоты вращения ротора включают подачу капель и отсчитывают время изнашивания образцов

По окончании испытаний останавливают привод ротора, отключают подачу воды в генератор, отключают вакуум-насос, разгерметизируют рабочую камеру и вынимают испытуемые образцы для контроля. Результаты первичных испытаний образцов представляют в координатах «потеря массы g_b - продолжительность изнашивания τ » (рис. 4.19).

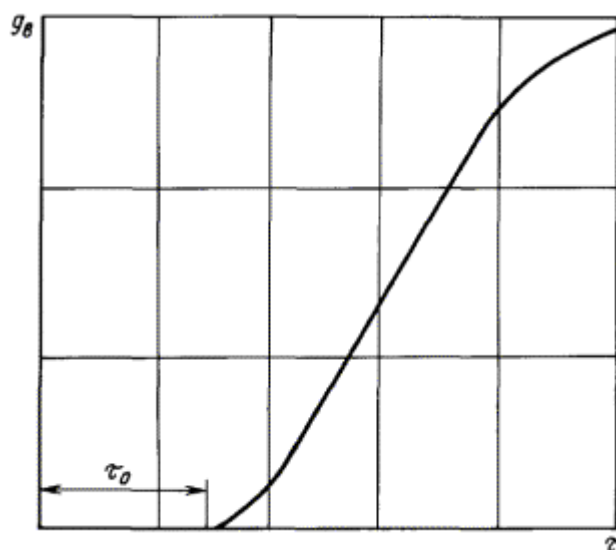


Рис. 4.19 – Зависимость потери массы (g_b) испытуемого образца от продолжительности его изнашивания (τ_0): - инкубационный период

Для защитных покрытий и элементов деталей определяют время до начала видимых визуально разрушений (отслоений) поверхностного слоя и до разрушения покрытия на всю толщину.

Кавитационное изнашивание происходит при захлопывании кавитационных пузырьков и сопровождается обычно движущимся в жидкости твердым телом. При кавитационном воздействии наиболее высокую стойкость против разрушения под воздействием взрывающихся на поверхности детали газовых пузырьков имеют нестабильные аустенито-карбидные и аустенито-мартенситные сплавы. При восстановлении гребных винтов и внешней поверхности цилиндрических втулок хорошие результаты были получены при плазменном напылении рабочих поверхностей самофлюсующимися никель-хромовыми сплавами с последующим оплавлением (рис. 4.20) (по А. О. Токареву).

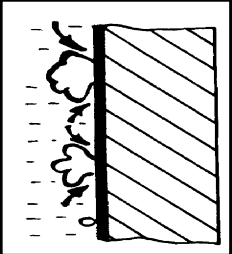
Кавитация	
	
Требуемая структура	Способ нанесения износостойкого покрытия и его обработки
Нестабильные аустенито-карбидные и аустенито-мартенситные сплавы	Электродуговая наплавка
Твёрдый никель-хромовый раствор с измельченными равномерно распределенными сложными карбидами	Плазменное напыление с оплавлением

Рис. 4.20 – Требуемые структуры и рекомендуемые технологии нанесения покрытий для повышения износостойкости при кавитационном изнашивании.

Испытания на износостойкость при кавитационном изнашивании в США устанавливает стандарт ASTM G 32.

4.3.5. Ударно-абразивное изнашивание

Ударно-абразивному изнашиванию (рис. 4.21) подвержены рабочие органы строительных, путевых, дорожных, почвообрабатывающих и других машин, оборудование горной и металлургической промышленности: ковши экскаваторов при разработке каменистых и мёрзлых пород, камнедробилки, свабойное оборудование, рабочие органы пневмоинструмента, кузнечно-прессовое оборудование, детали мельниц, засыпные аппараты печей, стрелочные переводы железнодорожного транспорта и т.д.

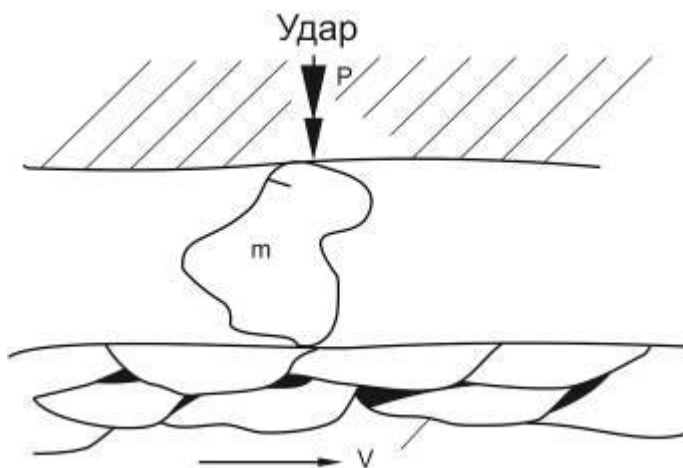


Рис. 4.21 – Схема ударно-абразивного изнашивания: m – масса частицы; P – ударная нагрузка; V – скорость перемещения изделия

Изнашивание поверхности происходит вследствие внедрения абразива в рабочую поверхность деталей. В зоне контакта развиваются упругие и пластические деформации, способствующие смятию металла под частицей в радиальном направлении и последующему тангенциальному сдвигу. Износостойкость поверхностей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания, определяется не только твёрдостью, но и в значительной мере трещиностойкостью. При ударно-абразивном воздействии твердая карбидная фаза в структуре стали, рядом с которой произошло деформирование пластичной матрицы, выкрашивается. При этом образуются новые

углубления, способствующие при последующем соударении проникновению в них твердых абразивных частиц. Механизм разрушения при ударно-абразивном изнашивании определяется многими факторами: энергией удара, физико-механическими характеристиками абразива, составом и свойствами испытуемого материала, степенью закреплённости абразивных частиц и т.д.

Традиционные методы поверхностного упрочнения стали (цементация и азотирование) оказываются неприемлемыми для деталей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания. Тонкие упрочненные слои, обладающие высокой хрупкостью, интенсивно выкрашиваются под действие ударных нагрузок. Причем трещины зарождаются не только на поверхности, но и на границе, отделяющей упрочненный слой от основного металла. Не были выявлены преимущества в износостойкости у твердых сплавов, хорошо зарекомендовавших себя при абразивном изнашивании. При определенных условиях нагружения их износостойкость оказалась ниже, чем у стали 45.

При проектировании лабораторных установок для ударных испытаний стремятся, с одной стороны, обеспечить качественную картину, подобную условиям эксплуатации, и с другой - унифицировать испытания для возможности сравнения результатов. В. Н. Виноградов и Г. М. Сорокин разработали методики и спроектировали установки для испытаний при ударе: по незакрепленному слою абразива определенной толщины, расположенному на металлическом основании; по абразиву, закреплённому на тканевом основании; по монолитному абразиву; по абразивной массе; металлических поверхностей без абразива. Две методики испытаний стандартизированы (ГОСТ 23.207, ГОСТ 23.212).

Для исследования ударно-абразивного изнашивания по ГОСТ 23.207 используют установку, приведенную на **рис.4.22**.

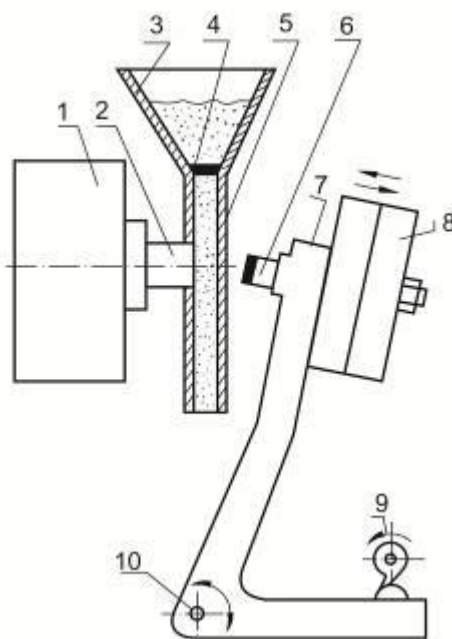


Рис. 4.22 – Установка для испытания на ударно-абразивное изнашивание: 1 - наковальня; 2 - сменный вкладыш; 3 - бункер; 4 -- заслонка; 5 - направляющий канал; 6 - образец; 7 - ударник; 8 - съемные грузы; 9 - торсион с кулачком; 10 - ось.

Цилиндрический образец 6, на одной из торцевых поверхностей которого нанесено покрытие, крепится в ударнике 7. Скорость удара регламентируют сменными грузами 8, энергию ударов - сменными торсионами 10. Абразивный материал из бункера 3 через коробчатый направляющий канал 5 подается в зону соударения образца о сменный вкладыш 2, установленный в наковальне 1. Скорость удара должна быть 0,5 -- 5,0 м/с, частота соударений – 20 -- 400 мин⁻¹ (устанавливают числом оборотов оси с кулачком 9). Масса неподвижной наковальни должна быть более 50 кг.

Установка, рекомендуемая ГОСТ 23.212 (рис.4.23), позволяет испытывать на изнашивание, вызванное прямыми многократными ударами об абразивную или металлическую поверхность при низких температурах.

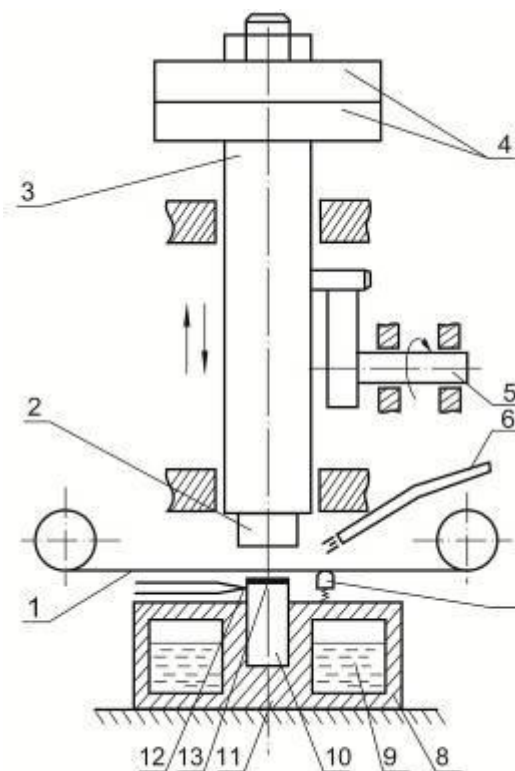


Рис. 4.23 – Установка для испытаний на изнашивание при ударе в условиях низких температур: 1 - абразивная лента; 2 - контробразец; 3 - ударник; 4 - сменные грузы; 5 - привод; 6 - механизм удаления продуктов изнашивания; 7 - приспособление для отвода абразивной ленты от образца; 8 - охлаждающая камера; 9 - охлаждающая среда; 10 - образец; 11 - станина; 12 – термopара; 13 – изнашиваемая поверхность

По образцу 10, охлажденному до заданной температуры, ударяет контробразец 2, поднимаемый на высоту $25 \pm 0,5$ мм. Энергию ударов регулируют сменными грузами 4, устанавливаемыми на ударник 3. Абразивная лента 1 перемещается периодически, специальное приспособление 7 отводит ее от образца во время перемещения. После удара продукты изнашивания удаляют струей сжатого воздуха по каналу 6. Температуру охлаждения образца регулируют по сигналу, от термopары 12 через блок автоматического поддержания температуры, который определяет объем подачи охлаждающей среды 9 из охлаждающей камеры 8,

установленной на станине 11. Частота соударений 60 мин^{-1} , температура охлаждения образца от 173 до 293 К.

При использовании износостойкого покрытия из нестабильных аустенито-карбидных и аустенито-мартенситных сплавов высокая трещиностойкость обеспечивается наличием вязкой структурной составляющей – аустенита, а высокая износостойкость – способностью к мартенситному превращению при механическом воздействии. Причиной хорошего сопротивления ударно-абразивному изнашиванию высокомарганцевой износостойкой стали 110Г13 является дробление зерен аустенита на весьма мелкие блоки и блокирование плоскостей скольжения карбидами. Отмечается также способность стали 110Г13 к фазовым превращениям вследствие удара. Указанные выше стали имеют следующее строение -- дисперсные твёрдые частицы в вязком твёрдом растворе.

Вместе с тем, для упрочнения деталей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания, применяют также и сплавы с относительно грубыми первичными кристаллами твёрдых соединений.

Для упрочнения бил шахтных мельниц, зубьев ковшей карьерных экскаваторов и других тяжело нагруженных деталей были разработаны и с успехом применены электроды, обеспечивающие при наплавке структуру, содержащую кристаллы боридов хрома, сцементированные эвтектикой. Хорошие результаты получают также при упрочнении рабочих поверхностей шарошек буровых долот, загрузочных аппаратов доменных печей и т. п. зёрнами релита (плавленного карбида вольфрама). Размер зёрен достигает при этом 200 – 300 мкм. Основу наплавленного слоя составляют самофлюсующиеся сплавы или малоуглеродистая сталь.

Требуемые структуры и рекомендуемые технологии для повышения ударно-абразивной износостойкости даны на **рис.4.24** (по А. О. Токареву).

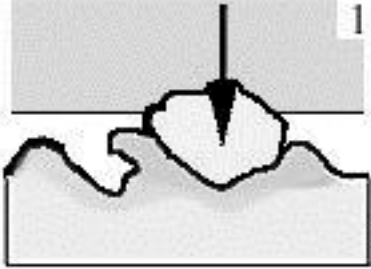
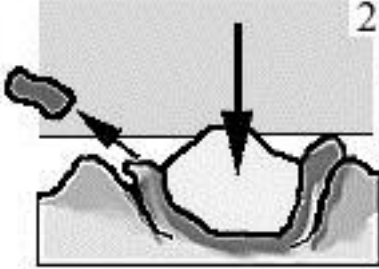
Ударно-абразивное изнашивание (ГОСТ 23212-82)	
 1  2 Высокая трещиностойкость Высокая твердость	
Требуемая структура	Способ получения износостойкого материала и его обработки
Нестабильные аустенито-карбидные сплавы (высокомарганцевая износостойкая сталь 110Г13)	Литье
Однородная мелкозернистая улучшаемая высококачественная сталь	Прокат
Нестабильные аустенито-карбидные и аустенито-мартенситные сплавы	Электродуговая наплавка Индукционная наплавка
Первичные карбиды в пластичной эвтектике	
Нестабильные аустенито-карбидные сплавы (высокомарганцевая износостойкая сталь 110Г13)	Сварка взрывом
Однородная мелкозернистая с полигональной субструктурой, допускаются мелкие глобулярные включения.	Газотермическое напыление с оплавлением
Сталь, армированная релитом (плавленый карбид вольфрама)	Индукционная и электродуговая наплавка

Рис. 4.24 – Требуемые структуры и рекомендуемые технологии для повышения ударноабразивной износостойкости

4.3.6. Изнашивание абразивно-масляной прослойкой (абразивной суспензией)

Этот вид изнашивания характерен для сопрягаемых поверхностей валов, втулок и др. при попадании абразивных частиц в смазку через уплотнения. (рис.4.25). Для деталей, работающих в паре трения, под термином «втулка» понимаются детали, охватывающие «валы». Это собственно втулки различного типа и назначения, подшипники скольжения и другие опоры, направляющие элементы приспособлений, станин станков, цилиндрические втулки двигателей внутреннего сгорания, гильзы экструдеров, седла различных клапанов, щетки токосъемников и т.п. Даже при хорошей очистке смазочная жидкость содержит до 1,5 % абразивных частиц.

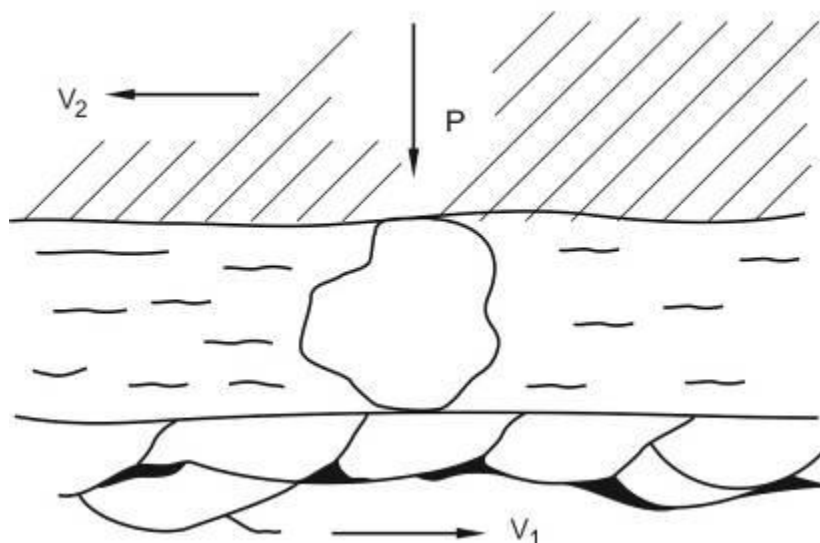


Рис.4.25 – Схема взаимодействия абразивной частицы с поверхностью при изнашивании абразивно-масляной прослойкой: P - нагрузка; V_1 и V_2 - скорости перемещения изделия и контртела.

Попавшие в зазоры пар трения абразивные частицы в зависимости от условий нагружения могут запрессовываться в поверхность трения, раздавливаясь на более мелкие фракции, скользить или перекатываться

вдоль поверхности изнашивания, упруго или пластически деформируя ее. Существенно влияют на скорость изнашивания пар трения удельная нагрузка и размер абразивных частиц, при увеличении которых нагрузка передается от одной детали к другой не только через слой смазочного материала, но и через абразивные частицы.

В настоящее время применяют две схемы испытаний на изнашивание абразивно-масляной прослойкой: пара скольжения -- "диск-колодка" (рис.4.26, а) и пара качения -- "диск-диск" (рис.4.26, б).

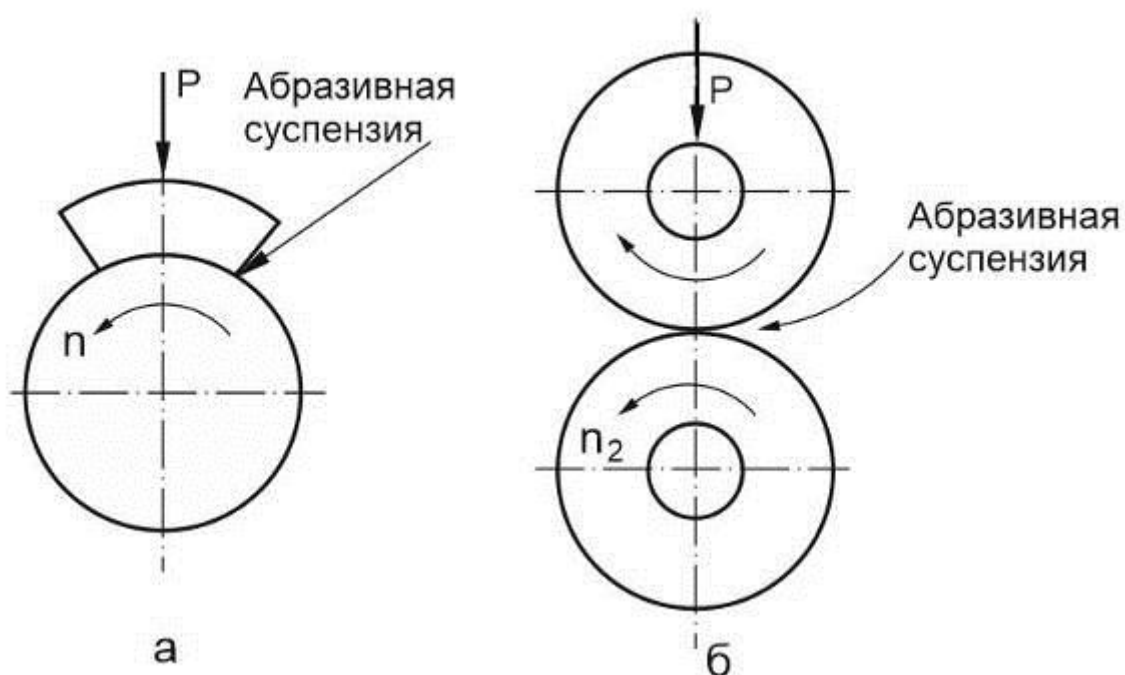


Рис. 4.26 – Схемы испытания на изнашивание абразивно-масляной прослойкой: "диск-колодка" (а), "диск-диск" (б).

Сущность методов (ГОСТ 23.224) в том, что образцы из исследуемого и контрольного материалов изнашивают по контробразцу с одновременной подачей в зону трения абразивно-масляной суспензии, измеряют износ образцов и оценивают износостойкость исследуемого материала сравнением с контрольным образцом. В качестве испытательного оборудования рекомендуется использовать машины трения.

Для дозированной подачи суспензии 6 используют бункер-дозатор (рис.4.27), на токовую катушку электромагнита которого подается питающее напряжение. В результате якорь 2, преодолевая действие пружины 3, притягивается к неподвижной части сердечника электромагнита 1 и поднимает клапан 4, открывающий отверстие насадки 5 для поступления суспензии. Продолжительность работы электромагнита, а, следовательно, и разовую подачу абразивно-масляной суспензии устанавливают с помощью реле времени. При отсутствии напряжения на катушке клапан под действием пружины перекрывает отверстие насадки. Перемешивают суспензию сжатым воздухом, поступающим в нижнюю часть резервуара через множество направленных вниз отверстий в трубке-спирали 7.

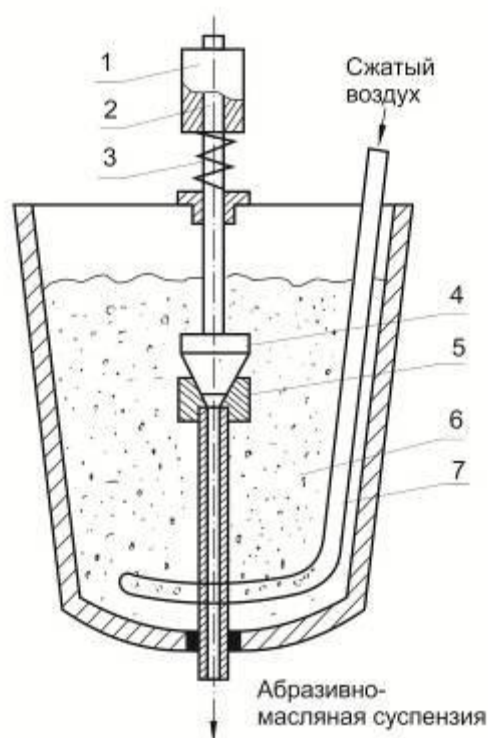


Рис.4.27 – Схема бункера-дозатора: 1 - электромагнит; 2 - якорь; 3 - пружина; 4 - клапан; 5 - насадка; 6 - абразивно-масляная суспензия; 7 - трубка спираль.

Абразивно-масляная суспензия может быть подана в зону трения также другим устройством (Рис. 4.28).

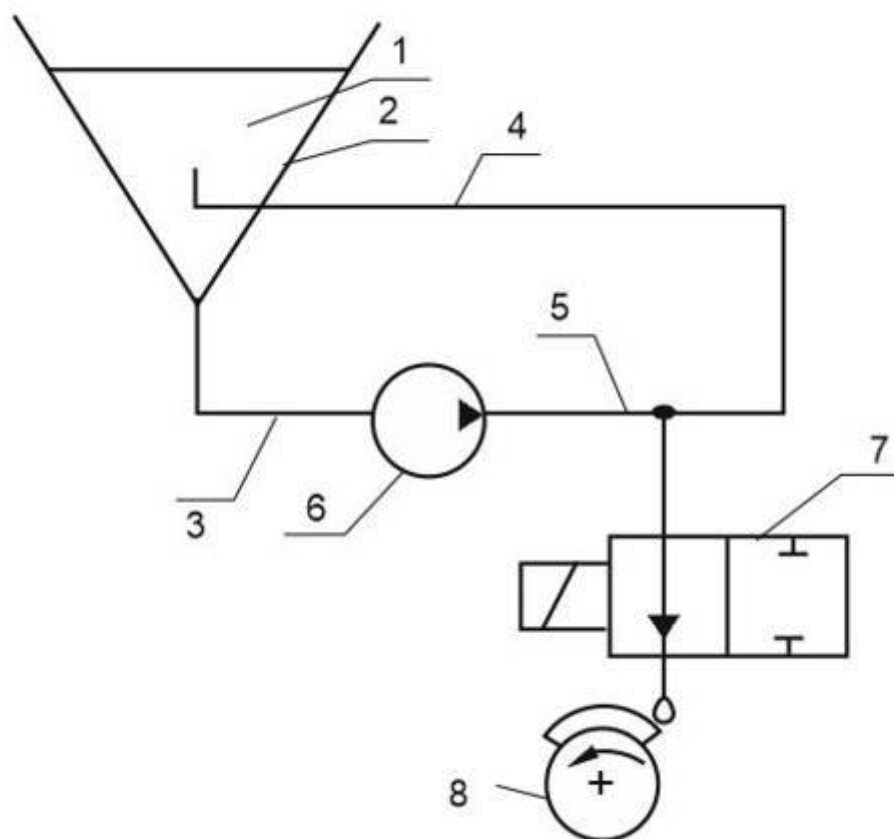
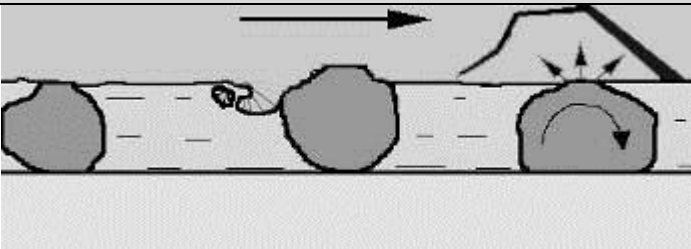


Рис. 4.28 – Гидравлическая схема устройства для получения и подачи в зону трения абразивно-масляной суспензии: 1 – абразивно-масляная суспензия; 2 – резервуар; 3 – всасывающий патрубок; 4 – напорный патрубок; 5 – магистраль; 6 – насос; 7 – клапан электроуправляемый; 8 – образцы.

Абразивно-масляная суспензия с заданной концентрацией частиц находится в резервуаре 1, к которому всасывающим 3 и напорным 4 патрубками подсоединена магистраль 5, выполненная в виде замкнутого контура. В магистраль последовательно включен насос 6, перекачивающий суспензию по магистрали, в напорную часть которой включен электроуправляемый клапан 7. Клапан открывается при подаче напряжения на обмотку и пропускает дозу суспензии к зоне трения образцов 2, установленных в испытательной машине. В США подобная схема установлена стандартом ASTM G 75.

Сопротивление абразивному изнашиванию деталей типа «вал», работающих в условиях трения со смазкой (рис. 4.29) увеличивается, если в структуре поверхностного слоя детали расстояние между включениями дисперсной фазы исключает проникновение абразивных частиц в матрицу. Учитывая возможный размер абразивных частиц, представляющих собой наклёпанные продукты износа, зольные частицы, образующиеся при сгорании топлива и т. д., распределение упрочняющей твёрдой фазы в матрице должно быть весьма тонкодисперсным.

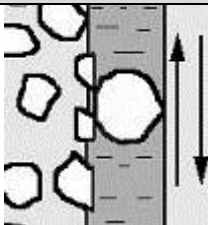
При восстановлении и упрочнении деталей типа «вал» порошковыми самофлюсующимися покрытиями измельчения твёрдой фазы - карбоборидов и участков тонкой эвтектики эффективно добиваются наложением при плазменном напылении ультразвуковых колебаний. Весьма тонкодисперсную структуру можно получить применяя для термической обработки напылённого газотермического покрытия непрерывный CO₂-лазер. Схема изнашивания и рекомендуемые технологии для повышения износостойкости деталей типа « вал» показаны на рис.4.29 (по А. О. Токареву).

Абразив в зазоре сопряжённых деталей («вал»)	
	
Требуемая структура	Технология упрочнения
Нестабильные аустенито-карбидные и аустенито-мартенситные сплавы	Плазменная наплавка
Тонкодисперсные карбиды в стали	Улучшение со скоростным отпуском

Сталь со структурой сорбита или троостита отпуска или бейнита с мелкодисперсными карбидами	Закалка с отпуском
Фрагментированная структура γ -твёрдого раствора с равномерно распределенными дисперсными карбоборидными фазами и участками тонкой эвтектики	Плазменное напыление с ультразвуковой обработкой
Тонкоразветвленная карбидная эвтектика, дисперсные карбобориды в Ni-Cr матрице	Оплавление самофлюсующегося сплава лучом лазера
	Припекание ТВЧ. Электроконтактное припекание

Рис. 4.29 - Схема изнашивания, требуемая структура и рекомендуемые технологии упрочнения для повышения износостойкости при изнашивании абразивно - масляной прослойкой деталей типа «вал»

При работе со смазкой условием износостойкости «втулок» является наличие на рабочей поверхности маслоудерживающего микрорельефа. Это может быть структура, созданная по принципу Шарпи: твёрдые включения в пластичной матрице. Схема изнашивания и рекомендуемые технологии для повышения износостойкости деталей типа « втулка» показаны на рис. 4.30 (по А. О. Токареву).

Абразив в зазоре сопряжённых деталей («втулка»)	
	
Требуемая структура	Способ получения и обработки

Маслоудерживающий микрорельеф: равномерно распределенные в перлите цементитные пластины. Равномерно распределённый пластинчатый графит.	Чугунное литье
Композиционные антифрикционные пористые материалы на металлической основе с регулярно чередующимися участками износостойкой и антифрикционной составляющей	Порошковая металлургия
Структура по принципу Шарпи: твердые включения в пластичной матрице	Газотермическое напыление с оплавлением

Рис. 4.30 - Схема изнашивания, требуемая структура и рекомендуемые технологии упрочнения для повышения износостойкости при изнашивании абразивно - масляной прослойкой деталей типа «втулка»

4.4. Изнашивание в парах трения

4.4.1. Факторы, определяющие процессы трения и изнашивания

Пара трения (фрикционная пара) система двух элементов (материалов), соприкасающиеся поверхности которых в процессе работы перемещаются (скользят) относительно друг друга.

На кривой интенсивности изнашивания деталей, работающих в паре трения (рис.4.31), выделяют несколько стадий. Первая характеризуется ростом интенсивности изнашивания. Это объясняется малой площадью контакта поверхности из-за макро- и микронеровностей и вследствие этого большими контактными нагрузками. В конце стадии приработки устанавливается равновесная, стабильная шероховатость поверхности. Одновременно происходят структурные превращения в поверхностном слое с образованием вторичных структур. В стадии установившегося изнашивания износ невелик и постоянен по величине. С течением времени

или при ухудшении условий работы может наблюдаться третья стадия - ускоренное изнашивание.

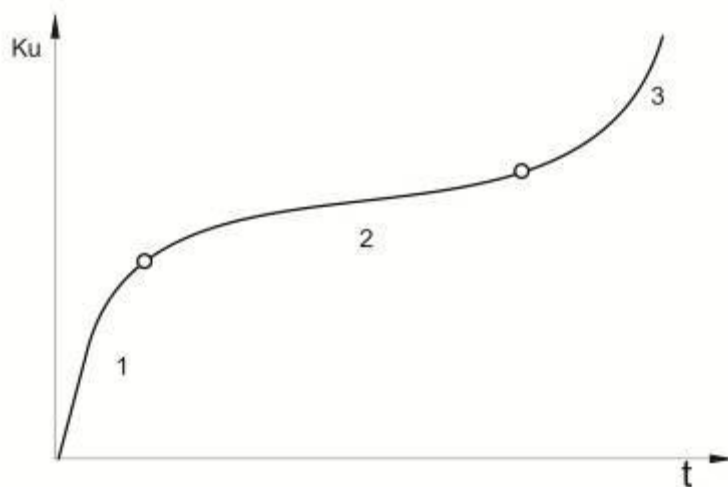


Рис. 4.31 — Кривая изнашивания любой поверхности. Стадии: 1 - приработки; 2 - равномерного изнашивания; 3 - ускоренного изнашивания;

K_u - интенсивность изнашивания; t — время.

Выделяют три группы факторов, определяющих процессы трения и изнашивания: технологические, конструкционные и эксплуатационные.

К первой группе относят: структуру (объемное или поверхностное упрочнение, наличие твердых смазок, антифрикционных присадок); физические свойства (теплопроводность, температуропроводность, ТКЛР, истирающая способность); механические свойства (прочность, трещиностойкость, твердость, пластичность, усталостные характеристики, прочность соединения покрытия с основным металлом).

Конструкционными факторами являются кинематический тип сопряжения; параметры шероховатости, прежде всего, среднее арифметическое отклонение профиля — Ra , высота неровности профиля по десяти точкам — Rz , а также направление неровностей по ГОСТ 2789; форма и размеры рабочих поверхностей. Знание рельефа и микрогеометрии поверхности необходимо, в частности, для определения фактической площади контакта (суммы фактических малых площадок контакта

поверхности тел) и фактической удельной нагрузки, т.е. нормальной нагрузки, приходящейся на единицу фактической площади касания контактирующих поверхностей.

Группу эксплуатационных факторов составляют температурные, силовые, скоростные и энергетические параметры нагружения. Комплексное влияние факторов трех групп определяет эволюцию структуры фрикционных поверхностей.

В поверхностных контактирующих слоях возможны изменения на макро- и микроуровнях. Макроизменения заключаются в пластической деформации поверхностных объемов, царапанию, отслаивании и выкрашивании материала в зоне фрикционного контакта, схватывания, заедания и задирах. На микроскопическом уровне происходят фазовые, структурные и субструктурные превращения, развивается дислокационная перестройка, разрушаются старые и устанавливаются новые химические связи, изменяется электронная структура поверхности.

4.4.2.Выбор метода испытаний

На лабораторных испытательных машинах трения при эталонном режиме нагружения или в условиях, имитирующих эксплуатационные, оперативно сравнивают технологические режимы упрочнения, решают задачи оптимального выбора химического состава материалов, контролируют стабильность свойств при трении, получают исходные данные для триботехнических расчетов, разрабатывают граничные условия эксплуатации испытываемых износостойких материалов. Сравнительные результаты лабораторных исследований материала могут быть использованы при стендовых или эксплуатационных испытаниях.

Опыты на машинах трения рассматривают как начальные в последовательной системе ступенчатых испытаний "лабораторные – стендовые - эксплуатационные". Результаты каждой предыдущей ступени

служат предварительными данными для определения износостойкости на последующих ступенях.

При оценке износостойкости применительно к конкретным условиям эксплуатации детали чаще всего воспроизводят один из кинематических типов сопряжений: внутреннее касание неплоских поверхностей ("цилиндр-цилиндр", "сфера-сфера") с близкими значениями радиусов кривизны; касание плоских поверхностей ("плоскость-плоскость"), внешнее касание неплоских поверхностей с разными радиусами кривизны ("направляющая - тело качения"). В зависимости от кинематического типа сопряжений деталей выбирают испытательную машину, размеры и форму образцов. Машина должна обеспечивать натурные значения давлений и скоростей скольжения, подачу смазки в зону фрикционного контакта, предполагаемую продолжительность испытаний.

В общем случае современные серийные машины трения имеют блок-схему, изображенную на рис. 4.32.

Основной узел машины, обеспечивающий обычно несколько схем испытаний, - испытательный блок 1. Привод 2 и узел нагружения 3 позволяют изменять в достаточно широких пределах скорости движения и удельную нагрузку. Передаточный механизм привода и узел нагружения обеспечивают стабильность движения образца и нормальной нагрузки независимо от изменений в процессе испытаний момента трения и величины износа.

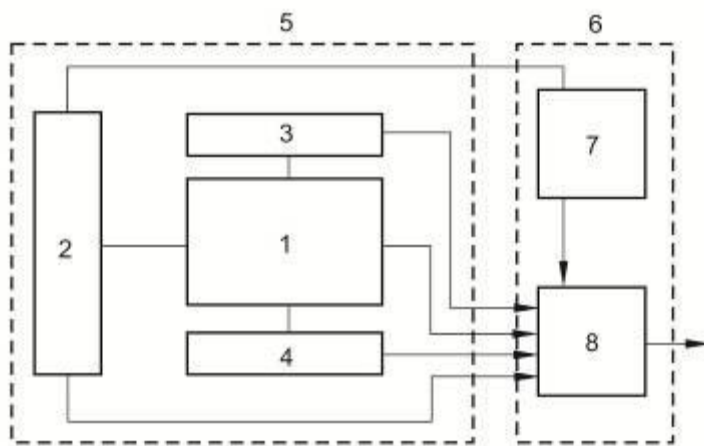


Рис.4.32 – Блок-схема серийных машин трения: 1 - испытательный блок; 2 - привод; 3 - узел нагружения; 4 - камера; 5 - собственно машина трения; 6 - пульт; 7 - блок управления; 8 - блок измерения (по Э. Д. Брауну и Б. Л. Смушковичу).

Для герметизации испытаний и подачи смазки в зону трения служит камера 4. Собственно машина трения 5 управляется с пульта 6, в который вмонтированы блоки управления 7 и измерения 8. На машинах трения измеряют и регистрируют параметры, необходимые для получения полной информации о процессе трения: момент (сила) трения, силу нормального давления, скорость трения (число оборотов образца или контртела), температуру в заданной зоне, работу трения и некоторые другие величины.

4.4.3.Машины трения

Для испытания материалов на трение и изнашивание обычно используют отечественные серийные машины МИ-1М, СМЦ-2, МФТ-1, МДП-1, УМТ-1, СМТ-1. Две последние относятся к наиболее универсальным современным установкам.

Машина трения УМТ-1 предназначена для испытаний и моделирования условий работы основных пар трения, встречающихся в машиностроении. В базовом варианте (рис.4.33) машина предназначена для испытаний образцов типа "диск-палец". От электродвигателя через клиноременную передачу

вращается шпиндель редуктора 10 с закрепленной планшайбой 8, предназначенной для установки на ней дискового образца 7.

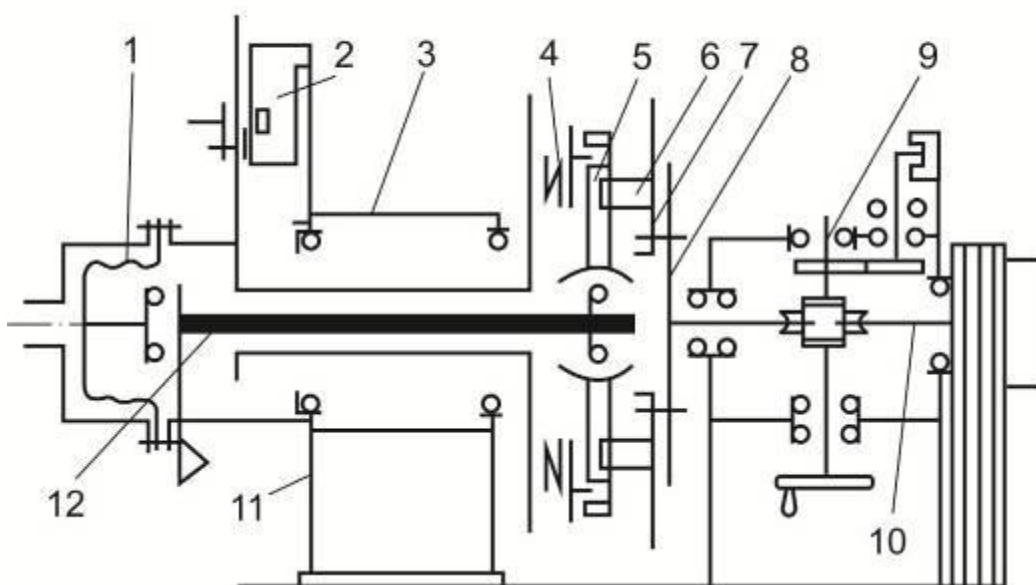


Рис. 4.33 – Универсальная машина трения УМТ-1: 1 -- нагружающий механизм; 2 - силоизмеритель; 3 - вал; 4 - гибкая связь; 5 - диск; 6 - пальчиковый образец; 7 - дисковый образец; 8 – планшайба; 9 - вал редуктора; 10 - шпиндель редуктора; 11 - бабка; 12 - вал бабки.

На вал бабки 12 насажен самоустанавливающийся диск 5, служащий для крепления трех пальчиковых образцов 6. Диск 5 посредством гибкой связи 4 соединен с полым валом 3, взаимодействующим с упругим элементом силоизмерителя 2. Нагрузка на образцы создается мембранным пневматическим механизмом 1. Обеспечиваются следующие схемы испытаний (рис.4.34).

1. Контактное взаимодействие торцов трех пальчиковых образцов диаметром 5 или 10 мм с вращающимся диском; образцы расположены под углом 120° ; радиус трения до 150 мм.

2. Контактное взаимодействие торцов двух кольцевых образцов с внешним диаметром 28 мм.

3. Исследование в камере с жидкой смазкой пары трения "вал-втулка" (диаметр поверхности трения от 30 до 40 мм).

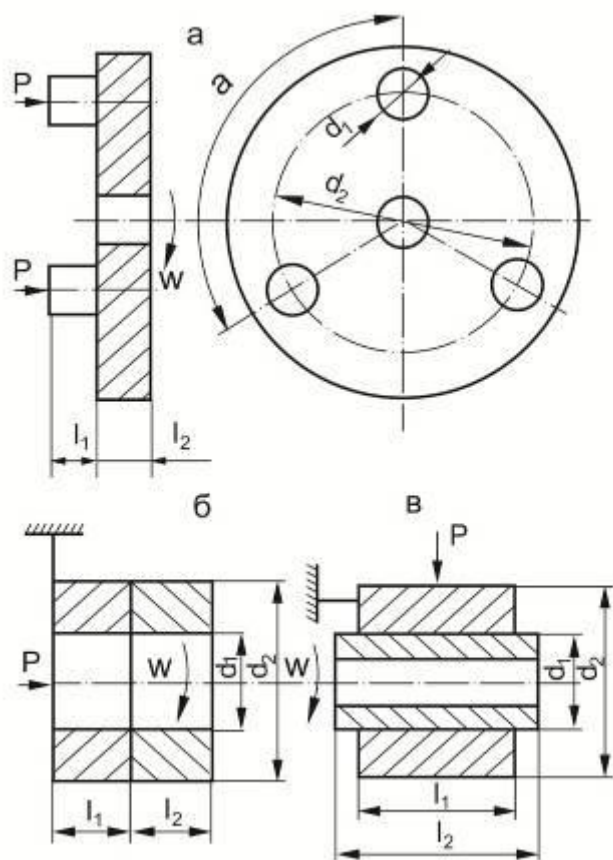


Рис. 4.34 – Схемы испытаний материалов на изнашивание на машине трения УМТ-1: а - "диск-пальчиковые образцы"; б - "кольцо-кольцо"; в - "вал-втулка" (две схемы).

4. Определение износостойкости при знакопеременном трении пары "вал-втулка" (имитация работы шарнира при качательном движении). Последняя схема на рисунке не показана. На пульте регистрируются: момент трения, температура в зоне трения, частота вращения и усилие прижима образцов.

В серийных установках серий **СМТ и ИИ** (рис.4.35) электродвигатель 18 через зубчатый ремень 1 вращает шкивы 3 и 5.

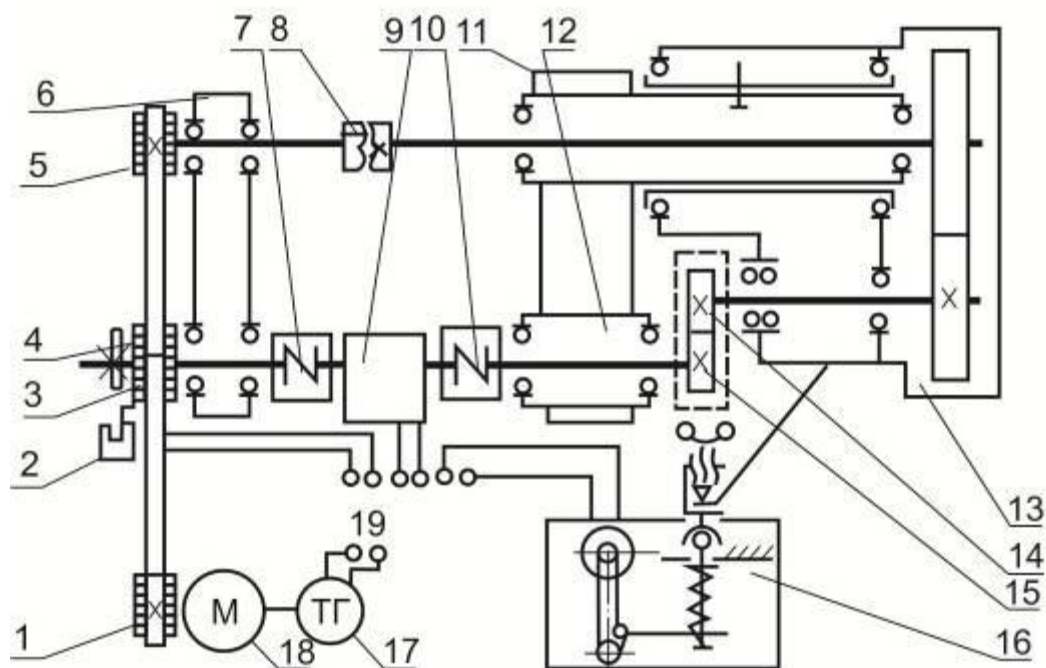


Рис. 4.35 – Установка СМТ-1:1 - зубчатый ремень; 2 - бесконтактный датчик числа оборотов; 3,5 - шкивы; 4 - предохранительный штифт; 6 - задний подшипниковый узел; 7,10 - муфты; 8 - разъемная муфта; 9 - индукционный датчик момента трения; 11 - передний подшипниковый узел; 12 - передняя бабка; 13 - каретка; 14,15 - образцы; 16 - механизм нагружения; 17 - тахогенератор; 18 - электродвигатель; 19 - пульт управления

Шкив 3 через предохранительный штифт 4, вал, муфту 7, датчик момента трения 9, перемещает вал балки, на котором устанавливается образец. Образцы 14, 15 прижимаются друг к другу пружиной устройства нагружения 16. Величина нагружения регулируется осью-винтом, который передает нагрузку на образцы через пята, кронштейн и корпус каретки. Частота вращения привода регистрируется тахогенератором 17, количество оборотов образца 15 - бесконтактным датчиком 2. Момент трения измеряется датчиком 9 и непрерывно регистрируется на самопишущем потенциометре на пульте управления 19.

С помощью машины СМТ-1 могут быть реализованы три схемы испытаний (рис.4.36).

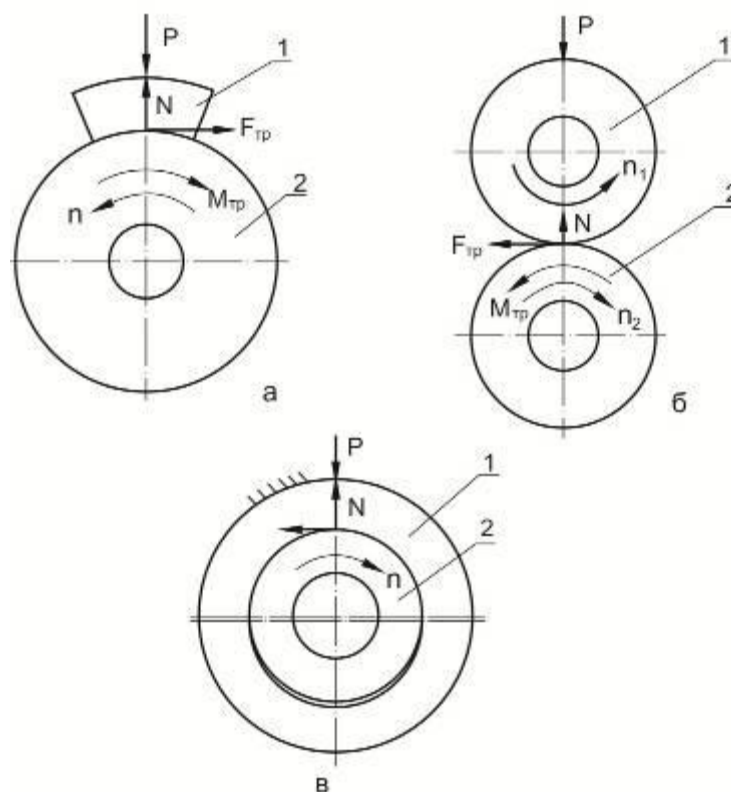


Рис. 4.36 – Схемы испытаний материалов на изнашивание на машине трения СМТ-1 в условиях трения: а -- скольжения (пара трения "диск-колодка"); б - качения с проскальзыванием (пара трения "диск-диск"); в - скольжения (пара трения "вал-втулка"): 1, 2 - образцы.

Смазку трущихся поверхностей обеспечивает специальная герметичная камера. Поскольку запись значений момента трения ведется непрерывно, установка позволяет наблюдать за процессом изнашивания и фиксировать изменения коэффициента трения во время работы. На машине, наряду с испытаниями на изнашивание, можно моделировать работу зубчатых передач, колес и рельсов железнодорожного транспорта, а также подшипников качения, т.е. реализовывать контактно-усталостное нагружение.

В каждом варианте испытывают образцы одинаковых размеров и форм, с одним способом подготовки поверхности, с одинаковыми параметрами шероховатости. Форму образцов выбирают в зависимости от

кинематического типа сопряжений, а также от применяемой машины трения. Образцы могут иметь размеры от нескольких сотен миллиметров до нескольких миллиметров, т.е. отличаться на несколько порядков. На рис.4.37 показаны образцы, используемые в современной машине трения СМТ-1.

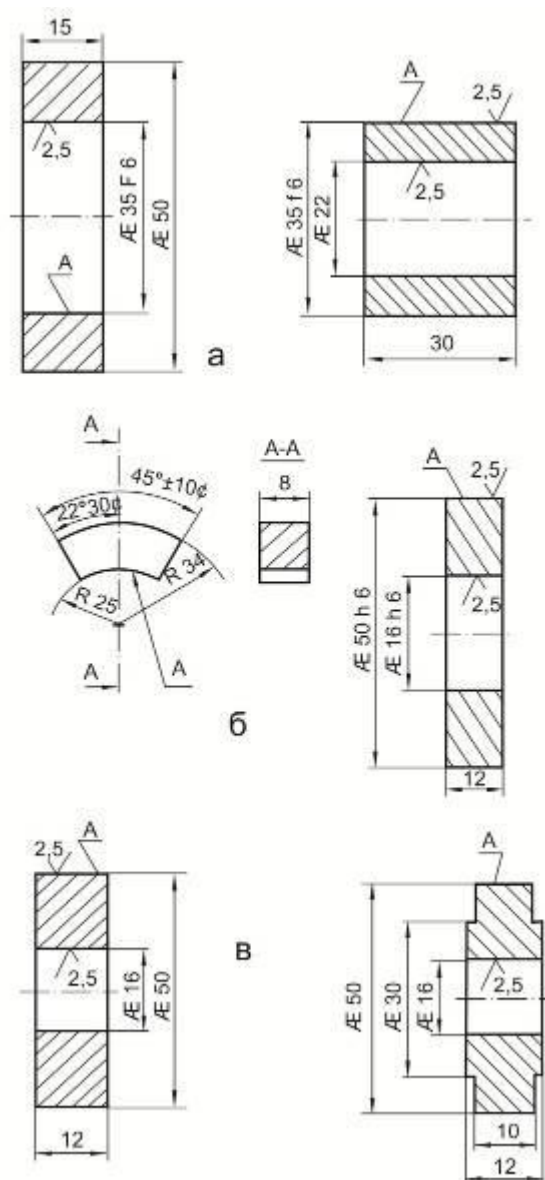


Рис.4.37 – Типы образцов, используемых для испытаний на машине трения СМТ-1: а - "диск-колодка"; б - "диск-диск"; в - "вал-втулка"; шероховатость поверхностей $Ra \leq 1,23$; неуказанные предельные отклонения Н7, $h7 \pm (IT7)$; А - изнашиваемая поверхность.

При проведении испытаний соблюдают следующую последовательность: образцы устанавливают на испытательной машине;

приводят в движение подвижный образец с частотой, обеспечивающей заданную скорость скольжения; устанавливают контакт между образцами; прикладывают заданную нагрузку. Образцы прирабатывают, а затем испытывают в нормальном или ускоренном режимах по ГОСТ 23.205.

Интенсивность изнашивания (I) вычисляют по формуле

$$I = \frac{W}{L} \quad (4.5)$$

где W - линейный износ образца, м;

L - путь трения данного образца, м.

Зависимости интенсивности изнашивания от скорости скольжения и удельного давления удобно представлять в прямоугольной (пространственной) системе координат (рис.4.38).

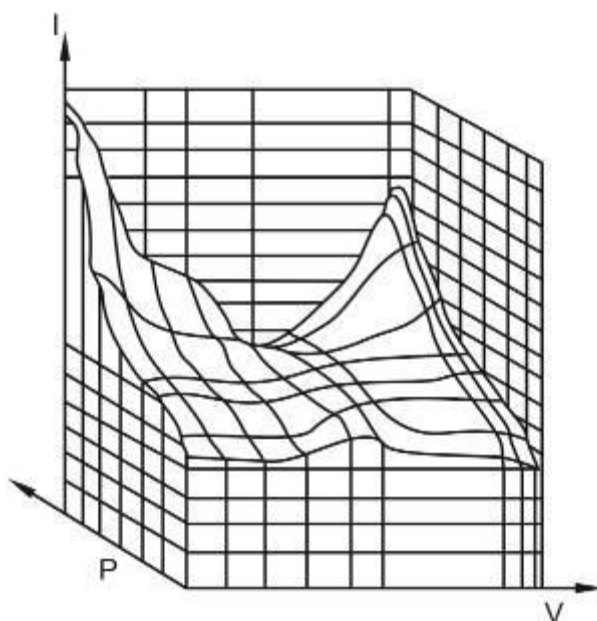


Рис. 4.38 - Диаграмма зависимости интенсивности изнашивания (I) от скорости скольжения (V) и удельного давления (P)

Эти зависимости могут быть использованы как исходные для решения задач прогнозирования ресурса с применением ЭВМ. На компьютере можно получить картину изменения состояния исследуемого узла трения с начала приработки до предельного износа. В течение малого времени ЭВМ способна

решать задачи прогнозирования ресурса и износа разнообразных узлов трения с учетом формоизменения деталей в результате изнашивания, неравномерности распределения удельных нагрузок на поверхности контакта и количества тепла, выделившегося при трении. Составлены программы решения триботехнических задач для некоторых кинематических типов сопряжений. По численным значениям интенсивности изнашивания для конкретных изделий (рабочих элементов цилиндропоршневой группы двигателей, тормозных накладок и барабанов автомобилей, деталей насосных установок) могут быть рассчитаны остаточный ресурс, его дисперсия и вероятность безотказной работы.

4.4.4. Анализ поверхностей трения

Численные результаты испытаний обычно дополняют данными микро- и макроанализов поверхностей трения, так как именно превращения, происходящие в зоне фрикционного контакта (в интервале толщин $10^{-8} - 10^{-6}$ м и даже менее), определяют механизмы изнашивания и разрушения.

Несколько десятков способов исследования поверхностей после изнашивания разделены на пять групп: элементный и химический анализ по электронным уровням; элементный и химический анализ посредством масс-спектро스코пии; элементный и химический анализ по уровням колебания кристаллической решетки; макро- и микроструктурный анализы. Сущность методов первых трех групп состоит в воздействии какого-либо первичного излучения (потока нейтральных или заряженных частиц, рентгеновского, магнитного или теплового полей) на изучаемую поверхность и в фиксировании и анализе вторичного или рассеянного излучения.

Современные приборы для изучения поверхностей обычно комбинированы и универсальны, с их помощью можно объединять в одной модели несколько способов испытаний. Комбинирование позволяет изучать один и тот же образец в высоком вакууме несколькими методами без риска дополнительно загрязнить поверхность. На микроуровне оценивают фазовые,

структурные, субструктурные и дислокационные изменения, химические превращения, электронную структуру поверхности.

Металлографически поверхности трения анализируют на продольных, поперечных и косых шлифах. Последний тип шлифов предпочтителен для изучения толщины и структуры образующихся пленок, а также для определения микротвердости приповерхностных слоев. Для определения профиля сопрягаемых поверхностей до и после испытаний целесообразно использовать поперечные шлифы. На продольных шлифах можно получать данные о рельефе поверхности, о качественных и количественных изменениях микроструктуры (после травления). К недостаткам метода продольных шлифов следует отнести трудность, а порой и невозможность исследования грубых рельефов из-за малой глубины резкости световых микроскопов.

Результатами анализов на макроуровне являются, прежде всего, данные об изменении геометрии поверхностей трения. Например, взяв за основу двухкоординатную систему измерений на профилографе и сделав несколько десятков замеров, можно построить изометрические изображения участка до и после изнашивания.

Для контроля шероховатости поверхности трения (макроструктурный анализ) используют контактные и бесконтактные приборы. Работа широко применяемых профилометров и профилографов основана на принципе ощупывания поверхности алмазным щупом, имеющим радиус кривизны вершины 2, 5 или 10 мкм.

Профилограф регистрирует координаты профиля поверхности и записывает в увеличенном масштабе профилограммы. Профилометром измеряют преимущественно среднее арифметическое отклонение профиля R_a по ГОСТ 2789. Колебательные движения щупа преобразуются в электрические сигналы. Пропорциональное мгновенному положению щупа напряжение на выходе усилителя измеряется прибором, показывающим

величину R_a . Комбинированный профилограф-профилометр записывает профилограммы в прямоугольных координатах, а также по показаниям стрелочного прибора определяет значения R_a .

К бесконтактным приборам для измерения шероховатости относят растровые измерительные микроскопы, приборы светового сечения, микроинтерферометры и т.д. Контактные и бесконтактные приборы позволяют измерять все параметры и характеристики шероховатости, установленные ГОСТ 2789. Практически для любого уровня микрорельефа поверхности подходит лазерный способ - один из самых современных способов изучения шероховатости.

4.4.5. Оценка фрикционной совместимости

На машинах трения СМТ, СМЦ, УМТ и ИИ в соответствии с ГОСТ 23.222 можно дополнительно оценить фрикционную совместимость материалов подвижного и неподвижного образцов. При этом определяют экстремальные температурные, силовые и скоростные условия эксплуатации в режиме несовершенной смазки. Рекомендуется использовать образцы типа "диск-колодка". В неподвижном образце на расстоянии не более 2 мм от поверхности трения зачеканивают головку термоэлектрического преобразователя. После приработки образцов до достижения стабилизации момента трения при частоте вращения (300 ± 10) мин⁻¹ устанавливают заданную нагрузку. При фиксированных температурах масла 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 °С (масло подогревается в ванне) регистрируют установившиеся значения момента сил трения и температуру образца.

При определении экстремальных температурных, силовых и скоростных условий эксплуатации в режиме несовершенной смазки по ГОСТ 23.222 сначала для каждой серии испытаний вычисляют средние для данной температуры значения коэффициента трения

$$f = \frac{M}{RP} \quad , \quad (4.6)$$

где M - среднее значение момента сил трения, Н·м;

R - радиус подвижного образца, м;

P - заданная нагрузка, Н.

Затем на графике зависимости коэффициентов трения и температуры образца от температуры масла определяют критическую температуру масла, при которой коэффициент трения начинает монотонно возрастать (рис.4.39).

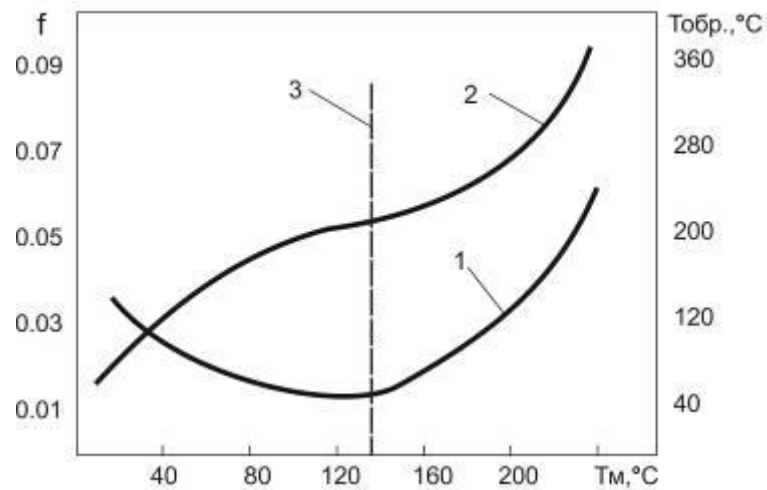


Рис. 4.39 - Зависимость коэффициента трения f и температуры образцов от температуры масла T_m : 1 - коэффициент трения; 2 - температура неподвижного образца; 3 - критическая температура масла.

Комплексную оценку совместимости проводят по критерию совместимости, определяемому по формуле:

$$C = \frac{1}{f_{кр}} \cdot \frac{T_{м.кр.}}{T_{обр.кр.}} \quad (4.7)$$

где $f_{кр}$ - коэффициент трения для критической температуры масла;

$T_{м.кр.}$ - критическая температура масла;

$T_{обр.кр.}$ - температура образца, достигнутая при критической температуре масла.

Лучшей совместимостью обладают материалы, обеспечивающие большие значения C .

4.5. Фреттинг-коррозия

4.5.1. Понятия и определения

Изнашивание при фреттинг-коррозии - это коррозионно-механическое изнашивание соприкасающихся тел при малых относительных перемещениях. Результат изнашивания - интенсивное хрупкое разрушение поверхностей трения. При фреттинг-коррозии одновременно протекают два процесса - схватывание и окисление, - причем их интенсивность значительно выше, чем в условиях обычного трения скольжения. Схватывание - местное соединение контактирующих поверхностей - наблюдается даже при невысоких нагрузках.

Фреттинг-коррозия наблюдается в валах, резьбовых соединениях, подшипниках качения, муфтах и других деталях, находящихся в подвижном контакте. Значительные скорости и интенсивности изнашивания контактирующих поверхностей деталей авиационных двигателей приводят к отбраковке большого количества дорогостоящих изделий. Этот вид коррозии является одним из самых опасных процессов разрушения деталей машин и может происходить как в условиях сухого трения, так и при наличии смазки.

Разрушение поверхности при фреттинг-коррозии проявляется в виде натиров, налипаний, раковин или вырывов, заполненных продуктами изнашивания. Первым диагностическим признаком фреттинг-коррозии служит появление на поверхности трения окрашенных пятен, в которых находятся деформированные оксиды. Рост амплитуды колебаний трущихся тел приводит к разрушению поверхности вследствие отслоения частиц материала и увеличения толщины оксидных пленок, причем продукты изнашивания обычно не удаляются из зоны контакта. Наряду с процессами

микросхватывания и окисления изнашивание интенсифицируется усталостными процессами и абразивным разрушением. Определяющая роль одного из этих процессов зависит от конкретных условий изнашивания.

Факторы, влияющие на развитие фреттинг-коррозии, возможные механизмы разрушения, вопросы защиты и методики количественной оценки рассмотрены в работах Н.Л. Голего и А.Я. Алябьева.

Механизм изнашивания при фреттинг-коррозии в упрощенном виде представлен на рис. 4.40. Первоначальное контактирование деталей происходит в отдельных точках поверхности (рис.4.40, а)

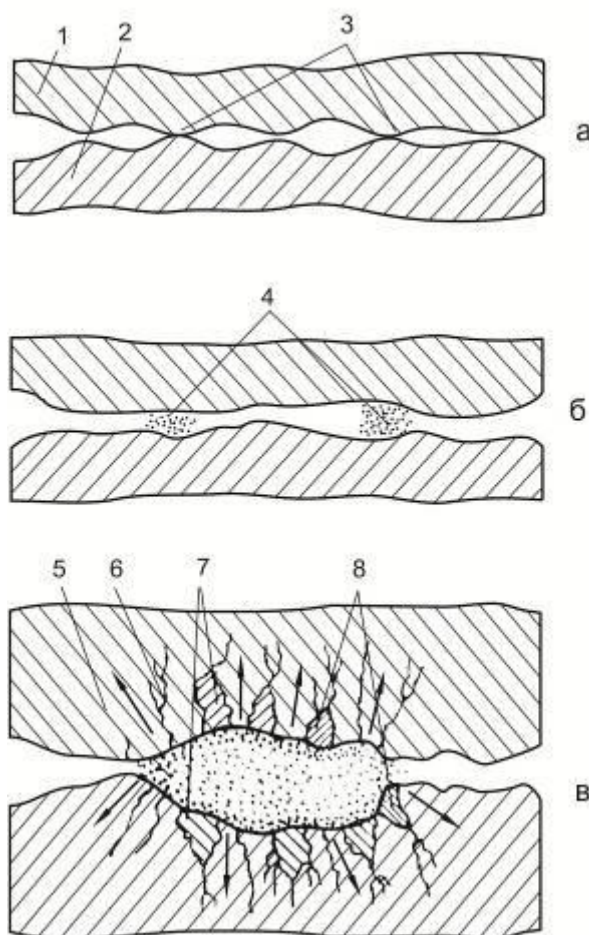


Рис. 4.40 – Кинетика изнашивания металлических поверхностей при фреттинг-коррозии: 1,2 – контактирующие детали; 3 – точки контакта поверхностей; 4 – мелкие зарождающиеся раковины; 5 – общая большая

раковина, 6 – трещины; 7 – отколовшиеся объёмы металла; 8 – отколовшиеся твёрдые оксиды.

При дальнейшем нагружении оксидные пленки в зоне фактического контакта разрушаются, образуются небольшие раковины заполненные оксидными пленками (рис. 4.40, б), которые постепенно увеличиваются в размерах и сливаются в одну большую раковину (рис.4.40, в). Последняя стадия фреттинг-коррозии связана с окончательным разрушением зон повреждаемости, предварительно разрыхленных усталостными и коррозионными процессами. С учетом возможности протекания электрохимических процессов эту стадию можно назвать стадией коррозионно-усталостного разрушения. В этот период поверхностные слои металла, длительное время подвергавшиеся циклическим деформациям, становятся настолько разупрочненными, что теряют устойчивость, и начинается их прогрессирующее отделение, что проявляется в увеличении скорости изнашивания.

Фреттинг-коррозия сопровождается дислокационными изменениями в поверхностных слоях металла. По мере удаления от поверхности различают три зоны с различной дислокационной ситуацией. В объемах, непосредственно прилегающих к зоне контакта, наблюдается высокая плотность дислокаций, металл текстурирован и наклепан. В следующей зоне характерно наличие большого количества двойников и интенсивная фрагментация с высокой степенью разориентировки блоков. В третьей, наиболее удаленной зоне, отмечается обычная дислокационная сетка. Полагают, что при фреттинг-коррозии на поверхности контакта возможно образование неравновесных структур, приближающихся к аморфному состоянию.

А.Я. Алябьев определял связь изнашивания и структурных изменений в поверхностном слое девяти сталей после лазерной обработки. Выявлен сложный характер воздействия лазерного излучения на структуру

поверхностного слоя, глубину фреттинг-повреждений и объемного износа. Показано, что лазерное поверхностное упрочнение позволяет создавать благоприятную структуру и повышать износостойкость в 1,5-3 раза в зависимости от содержания углерода в стали и параметров испытаний.

Влияние ионного внедрения шести различных элементов в поверхностные слои стали 45 на триботехнические характеристики при фреттинг-процессе рассмотрено в работах В.В.Ковалевского с соавторами. Авторы трактуют ионную имплантацию как технологию, позволяющую получать пленку-покрытие, или своеобразный поверхностный "сплав" со ступенчатым составом, постепенно переходящий в основной металл. Испытания на изнашивание при фреттинг-коррозии показали, что образцы после имплантации изнашиваются меньше. Так, при внедрении ионов бария, фреттинг-усталостная прочность при базе 10^7 - 10^8 циклов повышается более чем на 30 %. Это происходит вследствие того, что, во-первых, на поверхности образца образуется плотная, прочная и пластичная окисная пленка $BaTiO_3$, во-вторых, отсутствует явление схватывания, в-третьих, в поверхностных слоях наводятся весьма значительные напряжения сжатия. Нанесенные пленки уменьшают коэффициент трения на 10-17 % и сохраняют его в течение длительного времени испытаний, причем изнашивается в основном неупрочненный контрольный образец.

4.5.2. Образцы, оборудование, испытания

Для унификации испытаний и совершенствования средств экспериментального определения фреттингостойкости разработан ГОСТ 23. 211, устанавливающий метод испытаний материалов со смазочными материалами и без них. Стандартный образец изготавливают в соответствии с рис.4.41.

ГОСТ 23. 211 рекомендует испытывать образцы на установке МФК-1 (рис.4.42).

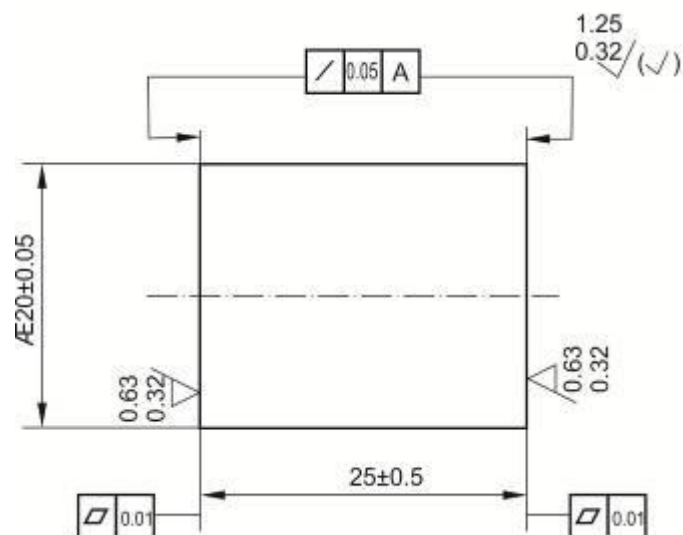


Рис 4.41 – Образец для испытаний на изнашивание при фреттинг-коррозии.

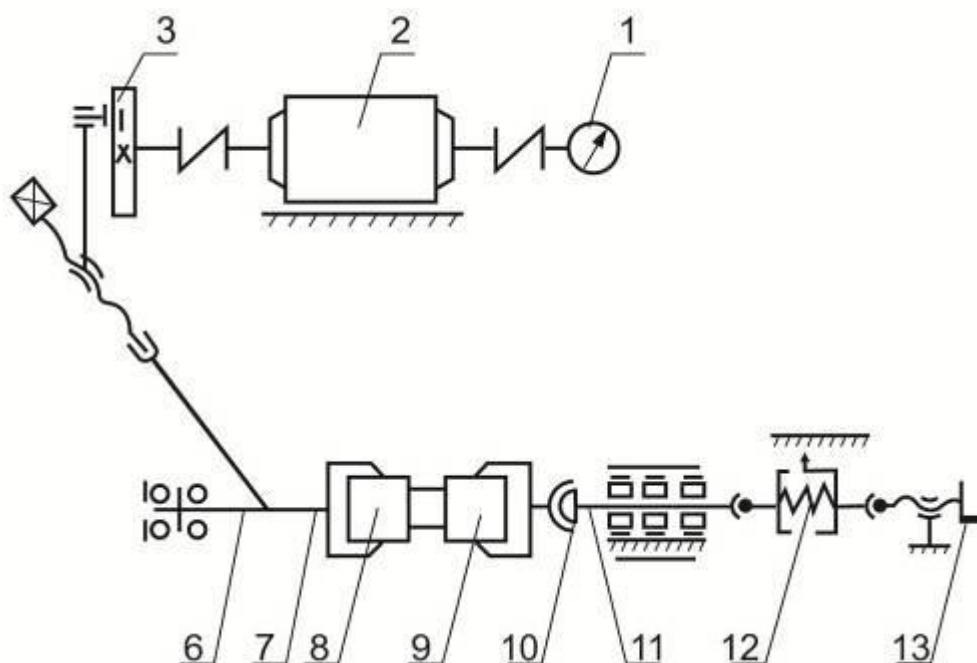


Рис. 4.42 – Установка МФК-1 для испытаний на изнашивание при фреттинг-коррозии: 1 - счетчик оборотов; 2 - электродвигатель; 3 - эксцентрик; 4 - шатуны; 5 - подстроечное устройство; 6 - кулиса; 7 - вал; 8 - контрообразец; 9 - испытуемый образец; 10 - самоцентрирующий зажим; 11 - подвижная бабка; 12,13 - нагружающее устройство.

Контробразец 8 соприкасается торцом с неподвижным цилиндрическим образцом 9, закрепленным в самоцентрирующемся зажиме 10. Нагружение осуществляется специальным устройством 12, 13 через подвижную бабку 11. Вращательное движение от электродвигателя 2 передается эксцентрику 3 с регулируемым эксцентриситетом. Эксцентрик через шатун 4 связан с кулисой 6 вала привода 7 возвратно-вращательного движения контробразца. Амплитуда перемещения контробразца регулируется эксцентриком и подстроечным устройством 5.

Образец закрепляют так, чтобы продольные оси зажимов, образца и контробразца совпали и были перпендикулярны рабочей поверхности. Рекомендуются следующие стандартные параметры: усилие - 500 ± 25 Н; амплитуда 50 ± 5 мкм, частота 30 ± 3 Гц; количество циклов нагружения - $5 \cdot 10^5 \pm 50$. При необходимости изменения характеристик нагружения, выбор их должен обуславливаться, с одной стороны, перекрытием наиболее типичных для фреттинг-коррозии параметров, а с другой - возможностью определения граничных условий эксплуатации материалов. ГОСТ 23.211 наряду со стандартными значениями давления, амплитуды, частоты и длительности исследований применительно к конкретным условиям допускает и другие режимы испытаний.

После проведения испытаний, съема образцов и очистки рабочих поверхностей, на оптическом микроскопе осматривают кольцевые дорожки трения. Характер разрушения может быть уточнен по данным металлографического анализа. Выявляют усталостные трещины, продукты окисления, отслоившиеся чешуйки, вторичные фазы, следы схватывания, участки пластической деформации, вырывы, задиры и царапины.

Профилографом-профилометром снимают профилограммы в радиальном направлении с восьми равноотстоящих участков рабочей поверхности через 45° по окружности. На полученных профилограммах проводят средние линии профиля исходной поверхности и кольцевой

дорожки трения и определяют расстояние между ними (износ) с погрешностью $\pm 0,5$ мкм. Данные, полученные для восьми участков, усредняют. Интенсивность изнашивания I_n определяют по формуле:

$$I_n = \frac{\sum_{i=1}^K n_i}{2ANK}, \quad (4.8)$$

где: n_i - средний износ образца, мкм;

A - амплитуда, мкм;

N - число циклов испытаний;

K - число испытанных образцов.

Результатом испытаний может быть построение графической зависимости интенсивности изнашивания от усилия (сжимающего напряжения) или температуры (при варьировании температуры), или другого изменяющегося параметра.

Повышения сопротивления фреттинг-коррозии добиваются применением лазерной закалки сталей, ионной имплантацией, азотированием, детонационным и газотермическим напылением. Цель этих видов упрочнения – создать структуру с высокими коррозионной стойкостью, статической и циклической трещиностойкостью. Отвечает этим требованиям структура газотермических покрытий и поверхностных слоев после ионной имплантации. Применяют также технологии нанесения на трущиеся поверхности слоя твердой смазки из меди или ее сплавов (рис. 4.43).

Несмотря на то, что фреттинг-коррозия широко распространена и часто приводит к катастрофическому разрушению наиболее важных деталей, применение современных технологий для повышения износостойкости еще не нашло должного распространения. Вероятно это связано с недостаточным изучением особенностей разрушения в зоне контакта, с отсутствием данных

о трибомеханических характеристиках при колебательных перемещениях соприкасающихся тел.

Рис. 4.43 – Структуры и износостойкие покрытия, оптимальные при фреттинг-коррозии

4.6. Истирающая способность

Истирание - удаление слоев материала за счет его изнашивания при трении скольжения. Значения высотных параметров Ra и Rz , которые обычно устанавливают для нормирования шероховатости изнашиваемых поверхностей, как правило, не могут характеризовать *истирающую способность*. Последняя зависит также от среднего шага неровностей S_m , среднего шага неровностей по вершинам S , относительной опорной длины профиля t_p и от направления неровностей. По данным М.М. Хрущова и Л.Ю. Пружанского показатель истирающей способности может отличаться более чем в шесть раз для поверхностей с одинаковым показателем шероховатости Ra .

Определять истирающую способность материала следует параллельно с оценкой его износостойкости. Не может считаться удовлетворительным тот материал, который, обладая достаточной износостойкостью, интенсивно истирает сопрягаемое контртело. ГОСТ 23.220 устанавливает метод оценки

истирающей способности валов диаметром от 10 до 100 мм после их восстановления или нанесения металлических покрытий. Метод позволяет быстро, комплексно и однозначно оценивать истирающую способность поверхности вала непосредственно на установке для нанесения покрытия или круглошлифовальном станке. Показателем истирающей способности покрытия является интенсивность изнашивания эталонного образца, прижимаемого к валу.

К материалу эталонного образца предъявляют следующие требования: фрикционная совместимость с испытуемым материалом; высокий износ, не сопровождающийся изменением рельефа поверхности материала; отсутствие химического взаимодействия с испытуемым материалом. Этим требованиям удовлетворяет прессованный фторопласт 4 по ГОСТ 10007 с плотностью 2,2 г/см³.

В схеме установки (рис. 4.44) на скобе 1 в державках расположены рабочие образцы 2, 3 из эталонного материала с первоначальной плоской поверхностью трения и опорный образец 4 из того же материала, предварительно приработанный по валу 5.

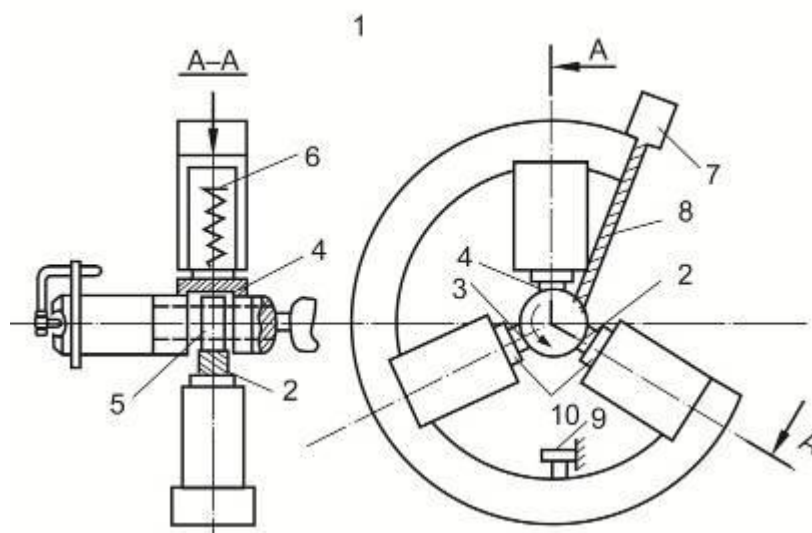


Рис. 4.44 – Установка для оценки истирающей способности восстановительных валов: 1 - скоба; 2,3 - образцы; 4 - опорный образец; 5 - вал; 6 - пружина; 7 - масленка; 8 - трубка; 9 - упор; 10 - державка.

Пружины 6 прижимают образцы к поверхности вала с фиксированной силой. В зону фрикционного контакта из масленки 7 подается индустриальное масло.

Образцы прирабатывают до получения цилиндрических углублений на всей рабочей поверхности и обеспечения надежного контакта в сопряжении. После испытаний с заданной частотой вращения в течение времени, которое соответствует пути трения 1000 м, образцы вынимают из державок, промывают и высушивают. Методами микрометрирования или взвешивания определяют линейный износ. Безразмерную интенсивность изнашивания (I) вычисляют по формуле:

$$I = \frac{\Delta h}{5 \cdot 10^5}, \quad (4.9)$$

где Δh - линейный износ, мм.

Полученная величина характеризует относительную истирающую способность поверхности вала.

4.7. Измерение износа

Метод оценки износа выбирают в зависимости от конкретных условий испытаний и формы образцов (табл.4.4).

Табл. 4.4 - Основные методы измерения износа.

Метод	Измеряемая величина	Условия реализации метода
Микро- метрирование	Размер детали	Многokратное превышение значения износа над предельной погрешностью измерительного инструмента
Искусственные базы, вырезанные лунки	Размер лунки, расстояние до базовой поверхности	Отсутствие замазывания, коррозии, пластической деформации базы (лунки)
Регистрация сближения образцов	Перемещение свободной поверхности	Отсутствие или компенсация тепловых и вибрационных воздействий на

Метод	Измеряемая величина	Условия реализации метода
	неподвижного образца относительно базы подвижного образца	измерительную систему и измерительный параметр
Профилографирован ие	Разница в профилях поверхностей до и после изнашивания	Отсутствие деформации поверхности под иглой профилографа
Взвешивание	Масса и контактная площадь образца	Наличие данных о плотности и пористости образца, полное удаление смазочного масла
Анализ содержания продуктов изнашивания в смазочном масле	Объем или процентное содержание продуктов изнашивания в смазочном масле	Наличие данных о плотности и пористости продуктов изнашивания, а также их полное вымывание смазочным маслом из зоны трения
Поверхностная активация по ГОСТ 23.209	Число импульсов радиоактивного излучения в заданный период времени	Наличие достаточно точных тарировочных диаграмм "радиоактивность-износ" для исследуемых материалов
Определение остаточной толщины покрытия	Толщина покрытия	Наличие покрытия достаточной толщины
Определение зазора в соединении деталей	Изменение потока (воздушного, электронного и др.), пропускаемого через зазор	Конструктивная возможность пропускания измерительного потока

Микрометрирование используют в случаях, когда изнашивание сопровождается большими изменениями размеров деталей. Линейный износ оценивают по разности размеров до и после испытаний. В качестве измерительных инструментов применяют концевые меры длины, оптические инструментальные микроскопы, микрометры и т.д. Приборы, позволяющие определять размеры с точностью до 1 мкм, дают возможность оценить линейный износ с точностью не менее 5 мкм. Увеличение погрешности связано с наличием деформации, неточностью установки измерительного прибора, непостоянством температуры измерений и т.д. С помощью микрометрирования находят лишь конечную величину износа без непрерывной его оценки при изнашивании.

Метод искусственных баз более точен. Он заключается в установлении линейного износа поверхности по заранее подготовленным меткам

определенных форм и размеров, путем их измерения до и после испытаний. Метод широко применяют для оценки износа направляющих металлорежущих станков, деталей текстильных машин, цилиндров авиационных и тракторных двигателей, поршневых колец и т.д. Искусственной базой может служить, в частности, дно углубления (лунки), от которого измеряют расстояние до изнашиваемой поверхности. Часто углубления наносят, вдавливая в поверхность изнашивания четырехгранную пирамиду на твердомере Виккерса или на микротвердомере. При этом линейный износ Δb определяют по формуле:

$$\Delta b = b - b_1 = \frac{(c - c_1)}{Z}, \quad (4.10)$$

где b , b_1 - соответственно глубины отпечатка, нанесенного на микротвердомере по ГОСТ 9450 или на твердомере Виккерса по ГОСТ 2999 до и после определенного этапа изнашивания, мм;

c , c_1 - соответственно длины диагонали отпечатка до и после определенного этапа изнашивания, мм;

Z - коэффициент пропорциональности (для пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине между противоположными гранями $136^\circ Z = 7$).

При использовании прибора ПМТ-3 для нанесения отпечатка точность измерения износа составляет доли микрометра (0,3 мкм). Вдавливание пирамиды на твердомерах сопровождается вспучиванием металла по краям отпечатка, что снижает точность метода. Кроме того, мелкие отпечатки трудно обнаружить после интенсивного изнашивания. При нанесении отпечатка на очень твердый материал вследствие "упругого восстановления" после снятия нагрузки размеры отпечатка заметно уменьшаются. При исследовании пластичных материалов, работающих при высоких контактных нагрузках, могут наблюдаться замазывание, заплывание отпечатка, потеря им отчетливой формы.

ГОСТ 23.301 устанавливает технические требования на приборы для измерения местного линейного износа по глубине вырезанных лунок для контроля плоских, цилиндрических выпуклых и цилиндрических вогнутых поверхностей. Лунки вырезают алмазным резцом, рабочая часть которого представляет собой правильную трехгранную пирамиду с углом при вершине между осью и гранью $65\pm 1^\circ$, углом между ребрами в плоскости грани 115° . Отклонение рабочей вершины резца от оси оправки, в которой он закреплен, не должно быть более 0,2 мм. Прибор имеет микроскоп, линейное поле зрения которого более 3 м.

По глубине вырезанных лунок износ измеряют в соответствии с ГОСТ 17534. Сначала, исходя из величины предполагаемого износа и целей исследования, вычерчивают схему расположения лунок и выбирают их глубину. Лунку вырезают на тщательно обезжиренной и просушенной поверхности при подаче резца 0,002-0,003 мм/об и радиусе вращения его вершины $11\pm 0,1$ мм (рис.4.45).

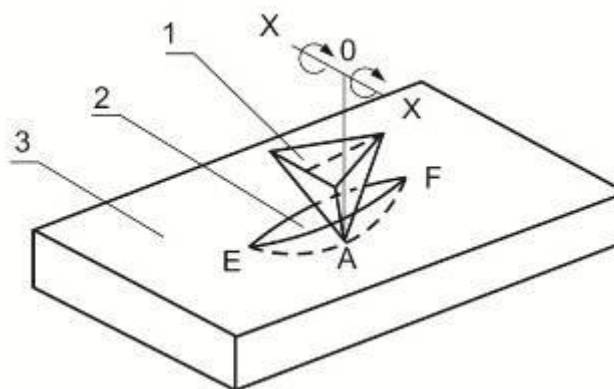


Рис. 4.45 – Схема вырезания лунки: 1 - трехгранный алмазный резец; 2 - лунка; 3 - поверхность трения детали (образца); X - ось вращения резца; E - длина лунки; OA - ось вращения вершины резца.

Линейный износ плоской и цилиндрической поверхностей при лунке, расположенной вдоль образующей цилиндра Δh вычисляют по формуле:

$$\Delta h = h - h_1 = 0,125(l^2 - l_1^2) \frac{1}{r}, \quad (4.11)$$

где: h, h_1 - глубина лунки до и после определенного этапа изнашивания, мм;

l, l_1 -- длина лунки до и после определенного этапа изнашивания, мм;

r - радиус вращения вершины резца, мм.

Линейный износ цилиндрических поверхностей при лунке, расположенной перпендикулярно образующей цилиндра, вычисляют по формуле:

$$\Delta h = h - h_1 = 0,125(l^2 - l_1^2)\left(\frac{1}{r} \pm \frac{1}{R}\right), \quad (4.12)$$

где: R - радиус кривизны поверхности в месте нанесения лунки, мм.

Знак "плюс" принимают для выпуклых, а "минус" для вогнутых поверхностей.

Глубины лунок для плоских поверхностей и поправки на радиус кривизны цилиндрических поверхностей по заданным длинам лунок можно также определять по таблицам, приведенным в ГОСТ 17534 и ГОСТ 23.301.

Износ методом регистрации сближения образцов измеряют с помощью преобразователей сопротивления, индуктивных (контактных и бесконтактных) и емкостных. Преимущества этих методов -- в возможности непрерывной регистрации износа, в высокой точности измерений и чувствительности приборов.

При использовании в качестве измерительного преобразователя тензодатчика изменение омического сопротивления определяют по величине упругой деформации тензодатчика, зависящей от перемещения свободной поверхности неподвижного образца относительно базы подвижного. Устройство (рис.4.46) состоит из корпуса 3, прикрепленного с помощью угольников 5 к свободной поверхности неподвижного образца, упругой балочки 2, изготовленной из плоской бронзовой пружины, собственно тензодатчиков 4, наклеенных на балочку, щупа 6, который контактирует с

подвижным образцом, пружины 1, осуществляющей предварительный натяг упругой балочки.

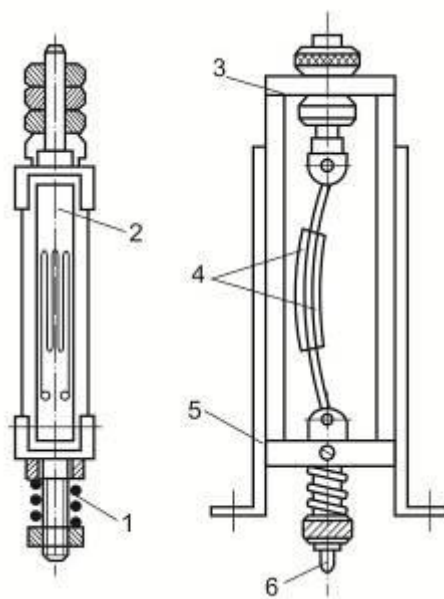


Рис. 4.46 – Устройство для измерения износа с помощью преобразователя сопротивления: 1 - пружина; 2 - упругая балочка; 3 - корпус; 4 - тензодатчики; 5 - угольники; 6 - щуп.

Оценка износа с помощью индуктивного контактного преобразователя -- механического щупа основана на принципе изменения индуктивности из-за изменения магнитного сопротивления в системе. Сущность бесконтактного измерения износа индуктивным датчиком заключается в изменении индуктивности, вызванной увеличением воздушного зазора. Использование индуктивного измерительного преобразователя позволяет в зависимости от масштаба усиления измерять значения износа от 20 до 200 мкм.

Емкостные измерительные преобразователи наиболее подходят для трибосистем с высокой скоростью изнашивания. Перемещение свободной поверхности неподвижного образца относительно базы подвижного связано в этом случае с изменением расстояния между пластинами измерительного конденсатора. Стандартное устройство (рис.4.47) изготовлено на базе электрического датчика давления.

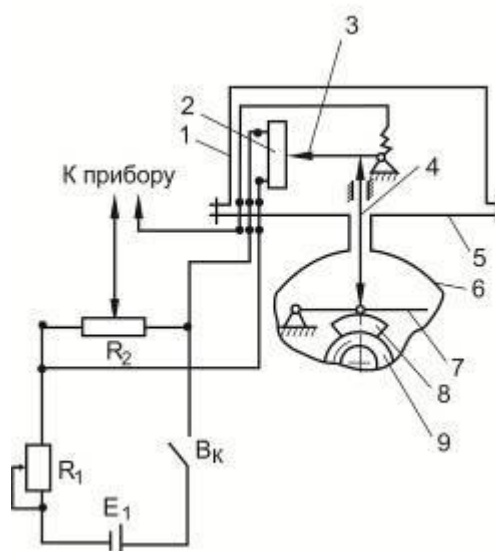


Рис.4.47 – Схема измерения износа с помощью измерительного преобразователя давления: 1- крышка; 2 – потенциометр; 3 – ползун; 4 – штифт; 5 – корпус; 6 – герметичная камера; 7 – рычаг; 8 – неподвижный образец; 9 – подвижный образец.

В корпусе 5, соединенном с герметичной камерой 6, размещен потенциометр 2 с ползуном 3, перемещаемым штифтом 4. Штифт опускается в результате уменьшения суммарного размера испытуемых неподвижного (колодки) 8 и подвижного 9 образцов, находящихся под нагрузкой. Образцы нагружаются через рычаг 7. В результате изнашивания образцов штифт опускается и, следовательно, перемещается ползун потенциометра. Это приводит к разбалансировке мостовой схемы, и на прибор будет подан электрический сигнал, величина которого прямо пропорциональна изменению размеров образцов (суммарному линейному износу). Градуируют устройство с помощью индикатора часового типа.

Износ плоских и цилиндрических поверхностей достаточно точно измеряют методом профилографирования. Применяют две разновидности этого метода. Одна описана в методике испытаний на фреттинг-коррозию, другая установлена ГОСТ 23.224. В последнем случае на поверхность исследуемого образца на твердомере Виккерса наносят два отпечатка таким образом, чтобы поверхность изнашивания находилась между ними. Глубина

отпечатков одинакова и превышает величину предполагаемого износа не более чем в два раза. Трасса профилографирования проходит через низшие точки отпечатков, которые в данном случае являются базовыми.

После проведения испытаний образец вновь устанавливают на профилограф. Трасса профилографирования считается воспроизведенной правильно, если в соответствии с **рис. 4.48** у профилограмм 1, снятых до и после испытаний, совпадут максимальные глубины отпечатков 2 и 3 и расстояние между нижними точками отпечатков.

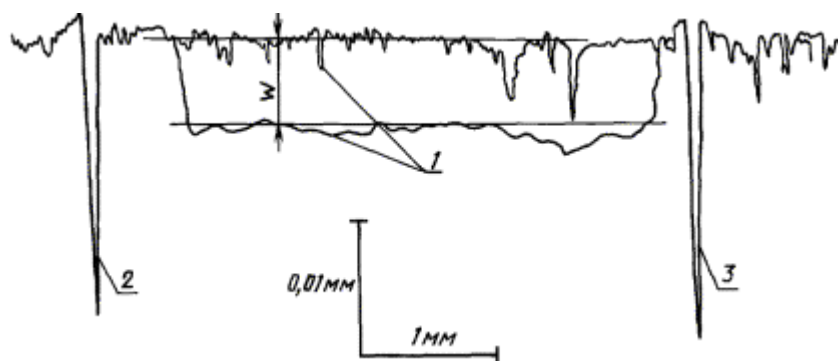


Рис. 4.48 – Измерение износа плоских поверхностей методом профилографирования.: 1—профилограммы, снятые до и после испытаний; 2,3—отпечатки; W - износ.

Для измерения износа W на каждом этапе испытаний при однократном профилографировании рекомендуется после каждого этапа изнашивания уменьшать хотя бы один размер изнашиваемого участка поверхности образца. Значения износа при этом определяют после проведения всех этапов изнашивания, используя сохранившиеся на образце участки изношенных поверхностей, сформировавшихся на каждом из этих этапов. Характерный вид профилограммы, полученный в соответствии с данной методикой, приводится на рис. 4.49. Сохранившиеся на образце участки изношенных поверхностей сформировались на различных этапах изнашивания: A и A' на этапе притирки, C и C' - на этапе прирабочных испытаний, D - на этапе испытаний на износостойкость. Таким образом, по профилограмме на рис. 3

определяют значения приработочного износа $W_{\text{п}}$ и износа в стационарных условиях $W_{\text{и}}$ как расстояния между средними линиями профилей поверхностей, сформировавшихся на соответствующих этапах.

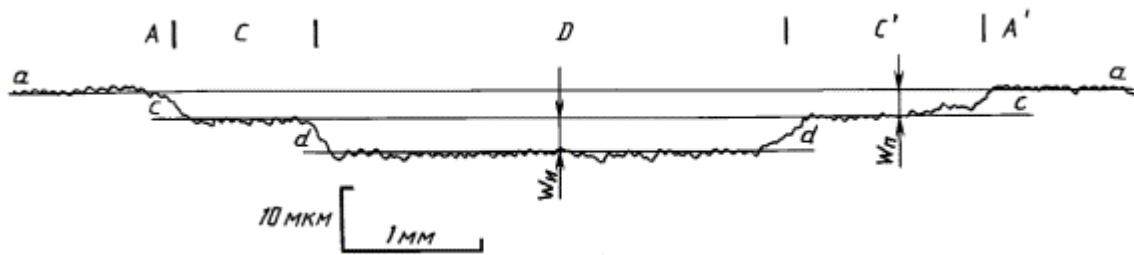


Рис. 4.49. Измерение износа на каждом этапе испытаний при однократном профилографировании (пояснения в тексте)

В ГОСТ 23.224 рекомендованы некоторые технические приемы для реализации этого метода для однонаправленного относительного движения сопряжений типа "диск-колодка" и для возвратно-поступательного движения в соединении "кольцо-гильза цилиндра".

Известны два варианта оценки износа методом взвешивания: определение массы продуктов изнашивания и определение массы изношенного образца. В первом случае погрешность испытаний зависит от тщательности сбора частиц. При сухом трении образцов продукты изнашивания могут быть собраны обдувом контактирующих поверхностей. При трении со смазочным материалом массу образующихся частиц износа определяют по разности результатов взвешивания мелкопористых мембранных фильтров, через которые пропускается смазка до и после изнашивания. В серийных испытаниях рекомендуется сепарировать частицы из масла на центрифугах или с помощью магнитов. Определять потери массы образца при изнашивании целесообразно тогда, когда масса отделившихся частиц сопоставима с его массой. Недостаток первого варианта - в невозможности разделения продуктов изнашивания образца и контробразца. Второй вариант используют только для небольших образцов. В обоих случаях при определении потери массы невозможно учесть явление переноса материала.

Оценку износа металлов по гашению сцинтилляций (свечения) смазочного масла устанавливает ГОСТ 23.206. Для получения сцинтиллятора в смазочное масло (веретенное, приборное, вазелиновое и др.) вводят специальные добавки. Испытывать образцы следует на установке, в которой предусмотрена система полного удаления продуктов изнашивания из зоны трения в масло.

Периодически в процессе изнашивания в измерительные стаканы отбирают постоянные по объему пробы сцинтиллятора, подвергающиеся затем радиометрическому анализу. Для этого применяют радиометрический прибор (радиометр) и специальный источник гамма-излучения, который помещают под стакан с отобранной пробой. По мере увеличения продуктов изнашивания от пробы к пробе уменьшается интенсивность сцинтилляций масла (количество импульсов в единицу времени). Износ определяют из построенной заранее тарировочной зависимости скорости счета импульсов проб смазочного масла от весового содержания в нем механических частиц.

Измерять износ, как в процессе испытаний, так и при эксплуатации можно методом поверхностной активации по ГОСТ 23.209. Выбранные участки на изнашиваемой поверхности активируют прямолинейным пучком ускоренных заряженных частиц. Активированный участок поверхности образца (детали) и преобразователь измерительной аппаратуры фиксируют относительно друг друга на минимальном постоянном расстоянии в процессе всего времени изнашивания. О величине износа можно судить по уменьшению интенсивности гамма-излучения, так как при изнашивании уменьшается толщина предварительно активированного участка. Численные значения среднего линейного износа определяют из тарировочных диаграмм зависимости количества импульсов (с учетом поправок на фон) от толщины снятого слоя.

Определение зазора (износа) в соединении деталей основано на реализации принципов пневматики. Из сопла в зазор между деталями в паре

трения подают воздушный поток, который оценивают с помощью пневматического измерительного преобразователя. Поток зависит от величины зазора, т.е. износа.

Достаточно часто многие детали машин подвергаются комбинированному изнашиванию, например, одновременно -- в паре трения, воздействию абразива и фреттинг-коррозии. Оценить вклад отдельных видов изнашивания в величину общего износа –достаточно трудная задача.

Список литературы

1. Батаев В.А., Методы структурного анализа материалов и контроля качества деталей: учебное пособие /В.А. Бытаев, А.А. Батаев, А.П. Алхимов. – 2-е изд. – М. : Флинта : Наука, 2007. – 224с.
2. Боудэн Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. - М.: - Машиностроение, 1986. - 543 с.
3. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Албагачиев А.Ю. Изнашивание при ударе. - М.: Машиностроение, 1983. - 192 с.
4. Гаркунов Д.Н., Триботехника : Учебное пособие / Д.Н. Гаркунов, Э.Л. Мельников, В.С. Гаврилюк. – 2-е изд., стер. – М. : КНОРУС, 2013. – 408 с.
5. Гаркунов Д.Н. Триботехника : Учебное пособие. - М.: Машиностроение, 1985. - 424 с.
6. Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. - Киев: Техника, 1974. - 269 с.
7. Гриб В.В. Решение триботехнических задач численными методами. - М.: Наука, 1982. - 111 с.
8. Добровольский А.Г., Кошеленко П.И. Абразивная износостойкость материалов. Справочное пособие. – Киев: Техника, 1989. – 211 с.
9. Карасик И. И. Методы трибологических испытаний в национальных стандартах стран мира. М.: Наука и техника, 1993. 327с.

10. Кащеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. М.: Машиностроение, 1978. 213 с.
11. Крагельский И.В. Трение и износ. - М.: Машиностроение, 1968. - 480 с.
12. Лейначук Е.И. Электродуговая наплавка деталей при абразивном и гидроабразивном износе. - Киев: Наукова думка, 1985. - 173 с.
13. Любарский И.М., Палатник Л.С. Металлофизика трения. - М.: Металлургия, 1976. - 176 с.
14. Методы анализа поверхностей: Пер. с англ. / Под.ред. Зауэрны А. - М.: Мир, 1979. - 582 с.
15. Мур Д. Основы и применение трибоники. - М.: Мир, 1978. - 487 с.
16. Пружанский Л.Ю. Исследования методов испытаний на изнашивание. - М.: Наука, 1978. - 116 с.
17. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла - М.: Машиностроение, 1982. - 212 с.
18. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Задачи материаловедения в проблеме износостойкости металлических материалов - М.: Машиностроение, 1991. - 54 с.
19. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. - Киев: Наукова думка, 1979. - 188 с.
20. Тененбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. - М.: Машиностроение, - 1966. - 331 с.
21. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. - М.: Машиностроение, 1975. - 271 с.
22. Трение, изнашивание и смазка: Справочник: В 2 кн. / Под.ред. И.В. Крагельского, В.В.Алисына. - М.: Машиностроение, 1978. - Кн.1. - 400 с.: Кн.2. - 358 с.

23. Тушинский Л.И., Плохов А.В. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий. - Новосибирск: Наука, 1986. 199 с.

24. Тушинский Л. И., Плохов А. В., Синдеев В. И. Защитные свойства поверхностных слоев после высокоэнергетических воздействий. Учебное пособие.- Новосибирск: НГТУ, 1996.- 193с.

25. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. - М.: Наука, 1970. - 252 с.

26. Шаповалов В.В., Триботехника : учебник / В.В. Шаповалов, В.А. Кохановский, А.Ч. Эркенов ; под ред. В.В. Шаповалова. – Ростов н/Д : Феникс, 2017. – 348.

27. Ясь Д.С., Подмоков В.Б., Дяденко И.С. Испытания на трение и износ: Методы и оборудование. - Киев: Техника, 1971. - 140 с.

5. Усталость и усталостные испытания

5.1. Много- и малоцикловая усталость

5.1.1. Понятия и определения

Под *"усталостью"* понимают способность материала воспринимать циклические нагрузки, постепенно накопления повреждения, приводящие к изменению свойств, образованию и развитию трещин и разрушению материала. Знакопеременные нагрузки воздействуют на большинство деталей современного машиностроения. Более 80 % разрушений осей, валов, шатунов, сварных конструкций, корпусных элементов обусловлены именно постепенным накоплением повреждений.

При *многоцикловой усталости* материал разрушается или повреждается в области упругой деформации, а при *малоцикловой усталости* – в упругопластической области (условная граница мало - и многоцикловой усталости -- 5×10^4 циклов).

На рис. 9.1 показаны стандартные схемы нагружения образцов, эпюры изгибающих моментов и циклы напряжений при усталостных испытаниях. По ГОСТ 23.207 к основным терминам при циклическом нагружении относят следующие.

Максимальное напряжение цикла – наибольшее по алгебраической величине напряжение цикла, равное алгебраической сумме среднего напряжения цикла ($\sigma_m ; \tau_m$) и амплитуды ($\sigma_a ; \tau_a$):

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a ; \tau_{\max} = \tau_m + \tau_a . \quad (5.1)$$

Минимальное напряжение цикла – наименьшее по алгебраической величине напряжение цикла, равное алгебраической разности среднего напряжения цикла и амплитуды:

$$\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a ; \tau_{\min} = \tau_m - \tau_a \quad (5.2)$$

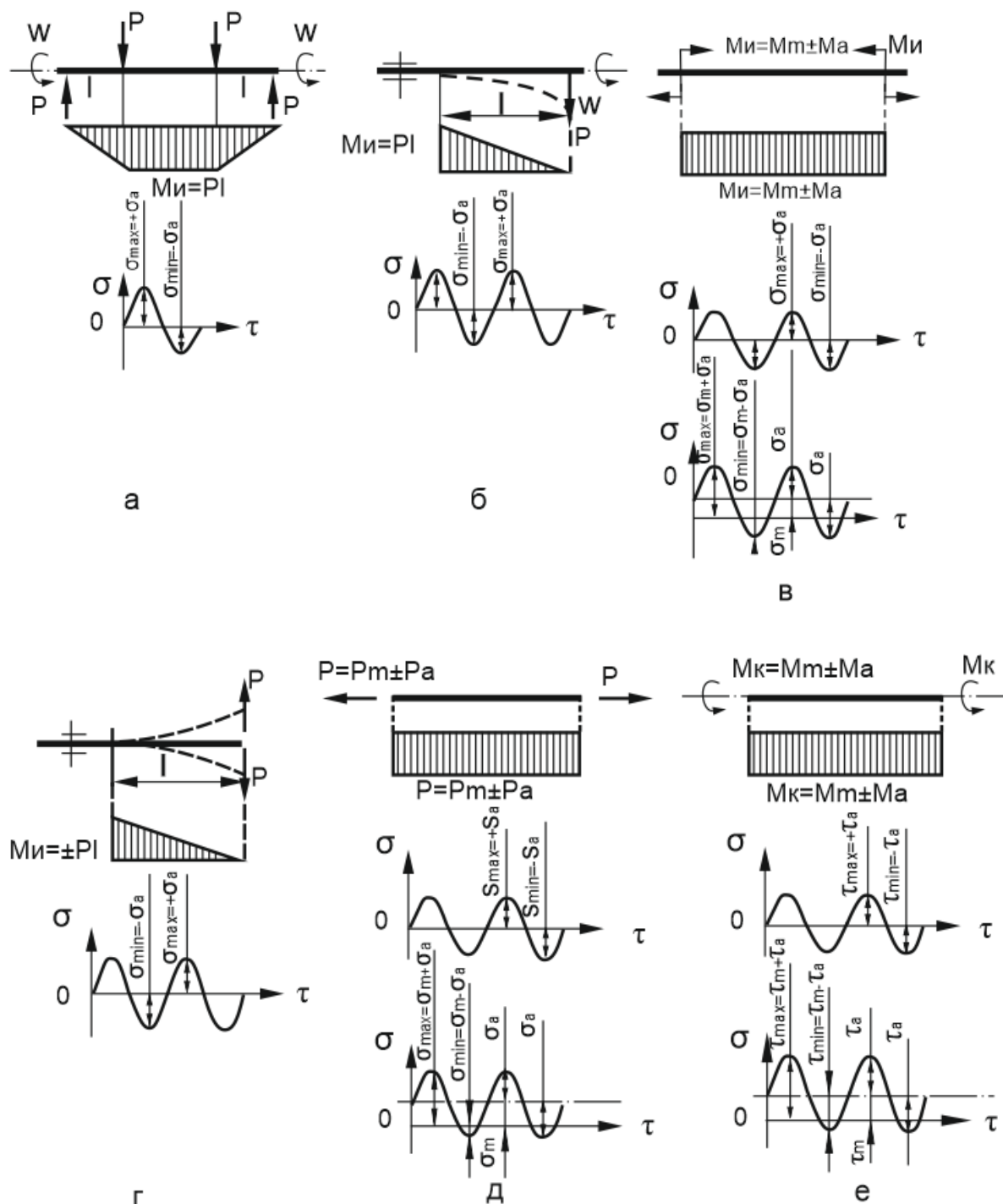


Рис. 5.1 – Схемы нагружения образцов, эпюры изгибающих моментов и циклы напряжений при усталостных испытаниях: а – чистый изгиб при вращении; б – поперечный изгиб при вращении при консольном

нагрузении; в – чистый изгиб в одной плоскости; г – поперечный изгиб в одной плоскости при консольном нагружении; д – повторно-переменное растяжение-сжатие; е – повторно-переменное кручение.

Среднее напряжение цикла – статическая (положительная или отрицательная) составляющая цикла напряжений, равная алгебраической полусумме максимального и минимального напряжений цикла:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \tau_a = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2}. \quad (5.3)$$

Амплитуда напряжений цикла – наибольшее (положительное) значение переменной составляющей цикла напряжений, равное алгебраической полуразности максимального и минимального напряжений цикла:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \tau_m = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2}. \quad (5.4)$$

Симметричный цикл напряжений – цикл, у которого максимальное и минимальное напряжения равны по величине, но противоположны по знаку:

$$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}; \tau_{\max} = -\tau_{\min}. \quad (5.5)$$

Асимметричный цикл нагружений – цикл, у которого максимальное и минимальное напряжения имеют разную величину.

Коэффициент асимметрии цикла – характеристика степени асимметрии цикла напряжений – равен отношению минимального напряжения цикла к максимальному:

$$R_{\sigma} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}; R_{\tau} = \frac{\tau_{\min}}{\tau_{\max}} \quad (5.6)$$

Усталостная прочность (выносливость) — способность материала воспринимать циклические нагрузки, не разрушаясь. Сопротивление материала усталости характеризуется кривой усталости. Несмотря на особенности материала и температуру испытаний кривые усталости обычно имеют прямолинейный, горизонтальный участок.

Предел выносливости (σ_R, τ_R) – характеристика выносливости материала, имеющего горизонтальный участок на кривой усталости. При испытании образцов с постоянным коэффициентом асимметрии цикла предел выносливости определяется как наибольшее значение максимального (по величине) напряжения цикла, при действии которого не происходит усталостного разрушения образца после произвольно большого количества циклов. При испытании образцов с постоянным средним напряжением цикла предел выносливости равен наибольшему значению амплитуды напряжений цикла, при котором не происходит усталостного разрушения после произвольно большого количества циклов. *База испытаний* – это предварительно задаваемая наибольшая продолжительность испытаний на усталость.

Долговечность – свойство детали (материала) сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов. Измеряется временем или количеством циклов нагружения.

Коэффициент влияния поверхностного упрочнения (покрытия) на усталостную прочность есть отношение предела выносливости образцов упрочненных (с покрытием) к пределу выносливости контрольных образцов (без покрытия).

Исследователи наноструктурных материалов Д. И. Рыжонков с сотр. показали, что тенденция значительного повышения усталостной прочности и долговечности в материалах с нано- и субмикроструктурой в сравнении с крупнозернистыми аналогами наблюдается достаточно отчетливо.

Среди теорий о природе усталостного разрушения наиболее распространена дислокационная концепция, разработанная В.С. Ивановой и В.Т. Трощенко. Согласно предложенной ими теории при незначительном числе циклов нагружения идет пластическая деформация, приводящая к деформационному упрочнению. При этом в металле увеличивается

плотность дислокаций, образуются дислокационные клубки, петли, могут появляться регулярные дислокационные построения. В поверхностных слоях металла изменение и формирование дислокационных структур идет более интенсивно, а это приводит к выходу линий скольжения на поверхность образца и последующей их (линий) трансформации в грубые рельефные полосы скольжения. С увеличением числа циклов нагружения около впадин, образовавшихся у полос скольжения, возникают зародышевые микротрещины. Большая часть микротрещин инициируется на начальных этапах нагружения за время, составляющее 10–15 % от полного времени испытаний. Несмотря на множество имеющихся трещин, лишь отдельные из них начинают распространяться. Это объясняется наклепом в локальных объемах у вершин большинства трещин. Распространяются и подрастают только те трещины, которые имеют достаточно малый радиус при вершине и критическую длину. На конечных стадиях нагружения происходит быстрое окончательное разрушение с образованием долома.

Основным признаком усталостного разрушения является наличие в изломе нескольких зон. После разрушения детали в многоциклового области в изломе различают четыре зоны.

1 – очаг зарождения усталостного повреждения. Это может быть небольшой концентратор напряжений на поверхности, с которого начинается развитие трещины – царапина, риска, раковина, неметаллическое включение и др.;

2 – зона постепенного продвижения трещины, для которой характерна гладкая блестящая поверхность как результат длительного притирания поверхностей;

3 – зона ускоренного развития трещины;

4 – зона долома, которая имеет поверхность, характерную для хрупкого разрушения от статической нагрузки.

В конкретных условиях эксплуатации при циклических нагрузках отдельные зоны в изломе после разрушения детали могут отсутствовать. На рис. 5.2 представлен излом после усталостного разрушения пружины.

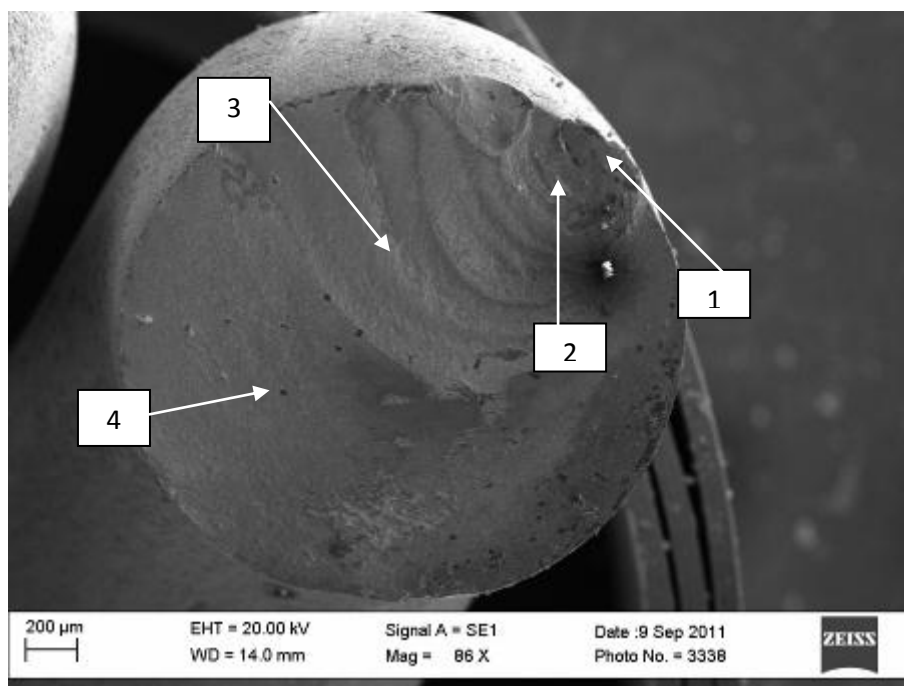


Рис. 5.2 – Разрушение пружинной проволоки. 1-очаг разрушения, 2- зона постепенного роста усталостной трещины, 3- зона ускоренного развития трещины, 4- зона долома.

Малоцикловая усталость возникает при максимальных напряжениях, превышающих предел текучести материала. Она сопровождается пластическим деформированием объема материала, большего по сравнению с размерами структурных составляющих (зерен, пор, включений). Число циклов до образования заметной трещины (длиной 0,5 – 1 мм и более) зависит в основном от величины пластической деформации детали в каждом цикле и от способности материала сопротивляться малоцикловому разрушению.

Многоцикловая усталость имеет место при максимальном напряжении цикла напряжения значительно меньшего предела текучести. В этом случае в макрообъеме материал деформируется упруго. Продолжительность стадии многоциклового усталости к моменту зарождения магистральной усталостной макротрещины для стальных конструкций превышает $10^5 - 10^6$ циклов.

Граница между малоциклового и многоциклового усталостью обычно не является четко выраженной.

5.1.2. Факторы, влияющие на усталостную прочность материалов

Факторы, определяющие усталостную прочность материалов настолько разнообразны, что их трудно даже перечислить. К главным из них относят характеристики цикла напряжений, масштабный фактор, качество обработки поверхности, поверхностное упрочнение, неметаллические включения, структура поверхностного слоя (покрытия) и основного металла, технология изготовления и геометрия образцов, среда и температура эксплуатации и др. Рассмотрим кратко влияние некоторых факторов.

1. Характеристики цикла напряжений. Чем больше максимальное напряжение цикла и его амплитуда, тем быстрее происходит усталостное разрушение. Существенное влияние на выносливость оказывает соотношение растягивающих и сжимающих напряжений. Чем больше растягивающие напряжения, тем ниже выносливость. Увеличение средних сжимающих напряжений при неизменном растягивающем смещает кривую усталости в сторону больших напряжений. Эти эффекты объясняются противоположным действием растягивающих и сжимающих напряжений на процесс раскрытия трещины. Дополнительное сжатие тормозит этот процесс, а растяжение ускоряет его.

Повышение частоты циклов при прочих равных условиях обычно вызывает некоторое увеличение характеристик выносливости, особенно при повышенных температурах. Наибольший предел выносливости получается при испытаниях по схеме изгиба, наименьший – при кручении.

2. Масштабный фактор. С увеличением размеров образца его предел выносливости уменьшается. К причинам проявления масштабного фактора можно отнести:

- статистическую – большая вероятность появления дефектов в структуре образцов больших размеров;
- технологическую – ухудшение структуры и свойств поверхностного слоя при механической обработке крупногабаритных деталей;
- металлургическую – ухудшение качества заготовки с увеличением ее размеров (литейные дефекты, дефектыковки и т. д.).

Влияние абсолютных размеров детали на предел выносливости материала определяют масштабным коэффициентом, который представляет собой отношение между пределом выносливости лабораторных цилиндрических образцов (диаметром до 10 мм) и пределом выносливости геометрически подобных деталей больших размеров.

3. Качество обработки поверхности. Усталостные трещины, как правило, зарождаются на поверхности детали (рис.5.3). Микронеровности (риски, шероховатость) от механической обработки, повреждения поверхности являются концентраторами напряжений и снижают предел выносливости.

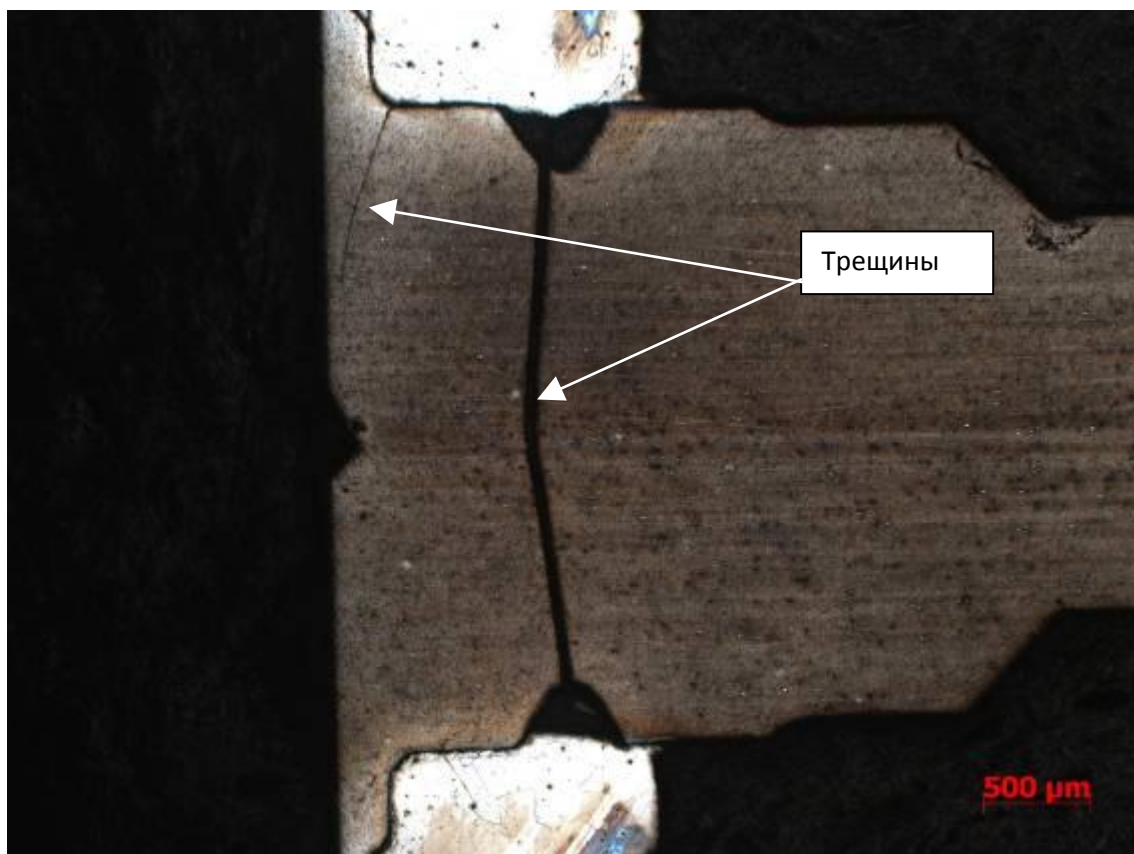


Рис.5.3 – Трещины в клапане топливной аппаратуры

Влияние качества поверхности на предел выносливости материала определяют коэффициентом качества поверхности, который представляет собой отношение предела выносливости лабораторных образцов с полированной поверхностью и пределом выносливости геометрически подобных образцов с обычной шероховатостью.

4. Поверхностное упрочнение. Применение методов поверхностного упрочнения приводит в ряде случаев к значительному повышению пределов выносливости (в 2–3 раза и более), что связано с формированием в поверхностном слое упрочненной детали сжимающих остаточных напряжений и повышением твердости поверхности.

5. Неметаллические включения разных типов: сложные силикаты, компактные сульфиды, точечные и строчечные включения оксидов, хрупкие

бориды и др. по-разному способствуют зарождению и развитию трещин при циклических нагружениях (рис. 5.4, 5.5).

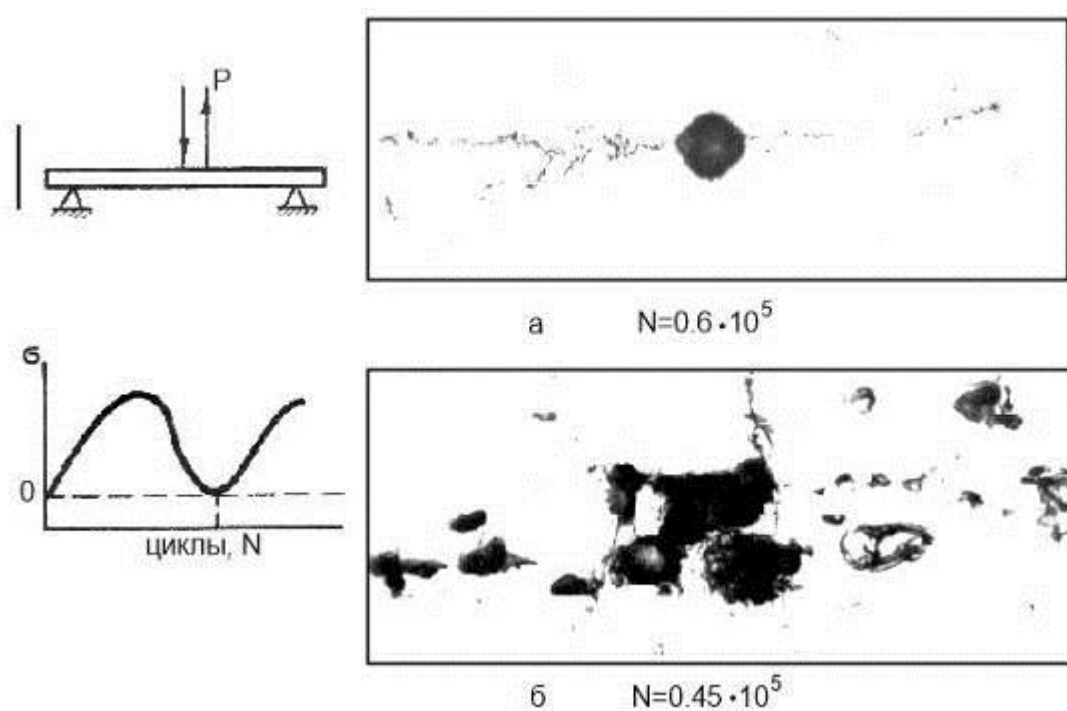


Рис.5.4 – Зарождение и распространение трещин от оксидов в стали У8 при циклическом нагружении: а – от отдельного оксида; б – от скоплений (строчек) оксидов; N – число циклов.

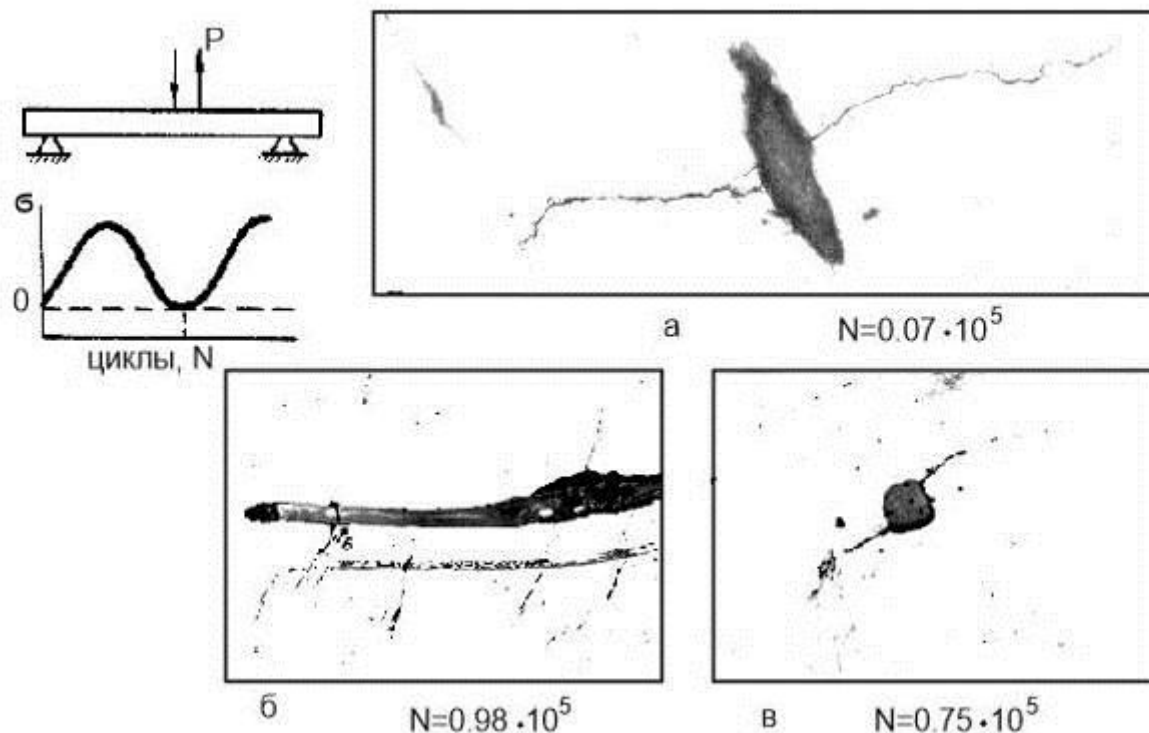


Рис. 5.5 – Зарождение и распространение трещин в стали У8 от неметаллических включений разных типов при циклическом нагружении от:
а – сульфида FeS ; б – силикатного включения; в – от глобулярного включения MnS ; N – число циклов нагружения.

Специальные методы обработки жидкого сплава, например, вакуумирование, промывка синтетическими шлаками, модифицирование и другие, уменьшают количество и меняют форму и размеры неметаллических включений, представляющих важный дефект макроструктуры материала (рис. 5.6).

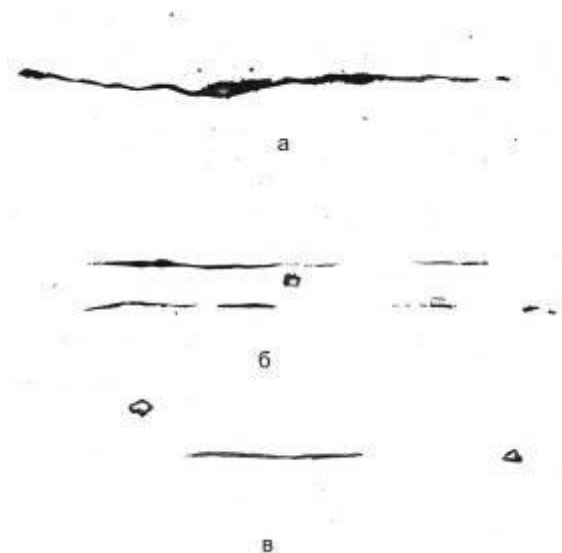


Рис. 5.6 – Размельчение сульфидных (FeS и MnS) включений в стали У8 модифицированием: а – сульфиды в стали без модифицирования; б – после модифицирования 0,05 % титана; в – после модифицирования 0,1 % титана; x400.

5.1.3. Образцы, оборудование, испытания

Испытания проводят на образцах, установленных ГОСТ 25.502. (рис. 5.7, табл. 5.1).

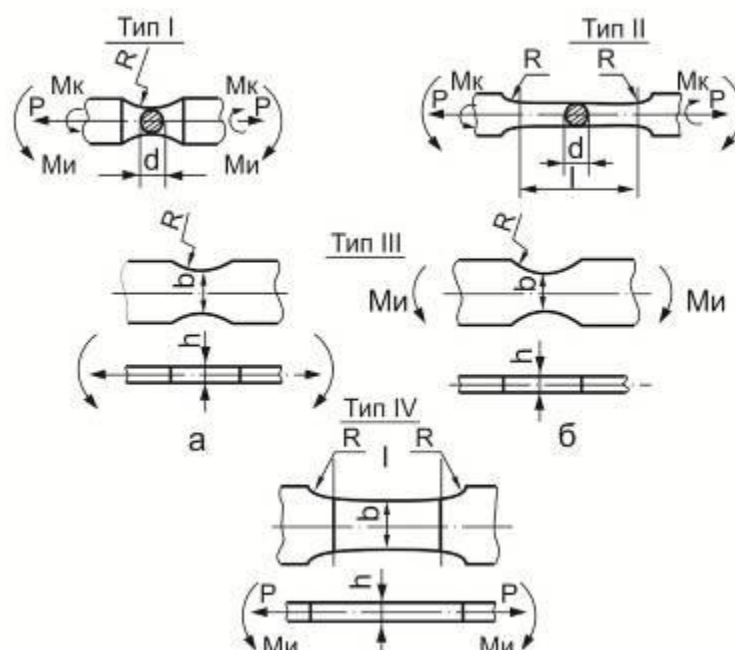


Рис.5.7 – Рабочие части образцов типов I-IV по ГОСТ 25.502

Таблица 5.1 - Размеры гладких образцов (по ГОСТ 25.502)

Тип образца	Размеры, мм							
I	d	5,0	7,5	10	12	15	20	25
	R	$\geq 5d$	$\geq 5d$	$\geq 5d$	≥ 90	≥ 90	≥ 90	≥ 90
II	d	5,0	7,5	10	12	15	20	25
	$l = 5d$	25	37,5	50	60	75	100	125
III,а (изгиб в плоскости размера h)	h	$\leq 3,0$				$> 3,0 - 10$		
	b	$10h$				$15 - 30$		
III,б (изгиб в плоскости размера b)	h	$3,0 - 20$				$0,5h - 2h$		
	b	$0,5h - 2h$				$\leq 5h$		
IV	h	$\leq 3,0$				$> 3,0 - 10$		
	b	$10h$				$15 - 30$		
	l	$5,6\sqrt{b \cdot h}$				$\geq 2b$		
	R	$\geq 2b$						

Чтобы выяснить роль покрытия в поведении образцов при заданном законе нагружения, необходима постановка экспериментов по изучению

влияния предварительной подготовки поверхности образцов перед напылением. Эксперимент планируют таким образом, чтобы была возможность разделения эффектов от подготовительных операций и от наличия покрытия. Поэтому в качестве контрольных рекомендуется использовать два вида образцов: одни изготавливаются в соответствии с ГОСТ 25.502, другие отличаются от стандартных тем, что их поверхность подвергается обработке, аналогичной той, какая предшествовала напылению.

Количество образцов должно быть не менее пятнадцати для испытаний в многоцикловой и пяти – в малоцикловой областях.

Выпускают типовые машины для испытаний по всем рассмотренным выше схемам нагружения. Установки и схема нагружения выбирают с учетом эксплуатационных требований. Образцы могут испытываться при жестком и мягком нагружении. В первом случае задается переменная деформация, во втором – переменное напряжение. В соответствии с ГОСТ 24217 машины для испытаний на усталость подразделяют на следующие типы: механические, электромеханические (с электромагнитным резонансным возбуждением) и гидравлические. Основные контролируемые параметры: наибольшие статическая и динамическая нагрузки, наибольший изгибающий момент и частота нагружения.

Механические машины для испытаний на изгиб вращающихся образцов при чистом и консольном изгибе нагружают сменными грузами или пружинами. При этом все время испытаний действующая сила остается постоянной.

Принцип работы электромеханических машин основан на возбуждении динамической нагрузки образца через механическую систему, связанную с электромагнитом, питаемым переменным током соответствующей частоты. Использование электромагнитных преобразователей дает возможность испытывать в диапазоне частот 50-600 Гц.

При работе гидравлических машин в нагружающий цилиндр под давлением впрыскивается минеральное масло. Гидравлические способы позволяют получать циклические нагрузки в сотни тонн в широком интервале частот нагружения: от долей герца до 100 Гц.

За базу испытаний в многоцикловой области принимают 5×10^6 - 10×10^6 циклов. Сопротивление малоцикловой усталости оценивают при долговечности до 5×10^4 циклов. Основная схема нагружения при этом – "растяжение-сжатие".

Допускаются ускоренные испытания на усталость. Сокращения времени можно достичь либо повышая частоту испытаний, либо исключая малые неповреждающие амплитуды. Для уменьшения времени испытаний при оценке предела выносливости используют метод ступенчатого увеличения нагрузки (метод Локати) по ГОСТ 19533. Образец или деталь нагружают начальным напряжением и испытывают в течение определенного количества циклов. Без промежуточных пауз напряжение увеличивают до некоторого уровня, при котором испытания продолжают в течение столько же циклов, что и на первой ступени. Увеличивая последовательно (ступенями) напряжение, образцы доводят до разрушения. Используя специальные монограммы, с учетом программы испытаний можно вычислить предел выносливости. Метод Локати позволяет сократить время испытаний в 30-70 раз.

Критериями дефектности образца считают усталостные повреждения на поверхности (выкрашивание и отслоение покрытия, появление трещин определенной длины) и усталостное разрушение (разделение образца на две части). При задаваемых напряжениях (деформациях) испытания продолжают либо до повреждения, либо до разрушения образца, либо до базы испытаний. При этом регистрируют число циклов. В соответствии с программой, для фиксации усталостных повреждений или разрушения, через определенные

интервалы времени образцы осматривают. Поврежденные и разрушенные образцы снимают.

На уровне предела выносливости должно быть испытано не менее трех образцов. Мерой сопротивления усталости при этом является отсутствие повреждений покрытия и целостность образца.

По результатам испытаний можно: построить кривую усталости; определить предел выносливости; построить кривые усталости в малоцикловой области; вычислить коэффициенты влияния покрытия и предварительной обработки на усталостную прочность.

Амплитуду напряжений цикла и средние напряжения цикла вычисляют по формулам теоретической механики (рис. 5.1 и табл. 5.2).

Таблица 5.2 - Вычисление амплитуды напряжений $\sigma_a(\tau_a)$ и среднего напряжения цикла $\sigma_m(\tau_m)$ для различных схем нагружения

Схема нагружения	$\sigma_a(\tau_a)$ $\sigma_m(\tau_m)$	Вспомогательные формулы
Чистый изгиб при вращении	$\sigma_a = \frac{M_{\text{и}}}{W_{\text{э}}}$	$W_{\text{э}} = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$
Поперечный изгиб при вращении и консольном нагружении	$\sigma_a = \frac{M_{\text{и}}}{W_{\text{э}}}$	$W_{\text{э}} = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$
Чистый изгиб в одной плоскости	$\sigma_m = \frac{M_m}{W_{\text{э}}}$	$W_{\text{э}} = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$
Поперечный изгиб в одной плоскости при консольном нагружении	$\sigma_a = \frac{M_a}{W_{\text{э}}}$	$W_{\text{э}} = \frac{B \cdot h^2}{6}$
	$\sigma_a = \frac{M_{\text{и}}}{W_{\text{э}}}$	$W_{\text{э}} = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$
		$W_{\text{э}} = \frac{B \cdot h^2}{6}$

Схема нагружения	$\sigma_a(\tau_a)$ $\sigma_m(\tau_m)$	Вспомогательные формулы
Повторно-переменное растяжение-сжатие	$\sigma_m = \frac{P_m}{F}$ $\sigma_a = \frac{P_a}{F}$	$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ $F = B \cdot h$
Повторно-переменное кручение	$\tau_m = \frac{M_m}{W_p}$ $\tau_a = \frac{M_a}{W_p}$	$W_p = \frac{\pi \cdot d^3}{16}$

Примечание: W_o – осевой момент сопротивления расчетного сечения образца; W_p – полярный момент сопротивления расчетного сечения образца; F – площадь поперечного сечения рабочей части; B , h , d – ширина, толщина прямоугольного и диаметр круглого образцов.

По полученным данным в полулогарифмических или логарифмических координатах строят кривую усталости – график, характеризующий зависимость между максимальными или амплитудными напряжениями (деформациями) цикла и долговечностью серии одинаковых образцов, испытанных при одинаковом коэффициенте асимметрии цикла или при одинаковой амплитуде напряжений цикла (рис. 5.8).

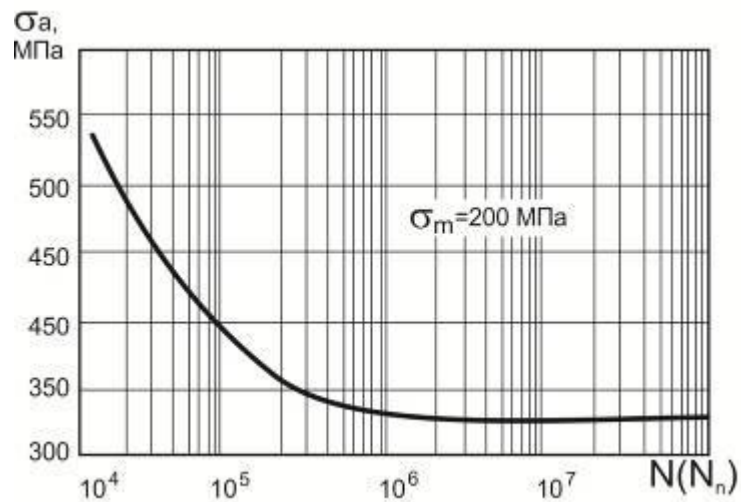


Рис. 5.8 – Кривая усталости в координатах $\sigma_a - \lg N(N_n)$ при одинаковом σ_m

Долговечность выражают числом циклов до образования усталостного повреждения N_n или до разрушения образца N .

Роль покрытия может быть выражена через коэффициент влияния покрытия на усталостную прочность:

$$K_{\Pi} = \frac{\sigma_{R_{\text{покр}}}(\tau_{R_{\text{покр}}})}{\sigma_R(\tau_R)}, \quad (5.7)$$

где: $\sigma_{R_{\text{покр}}}(\tau_{R_{\text{покр}}})$ – предел выносливости образца с покрытием МПа;

$\sigma_R(\tau_R)$ – предел выносливости контрольного образца, изготовленного в соответствии с ГОСТ 25.502, МПа.

При необходимости может быть определен коэффициент влияния предварительной обработки на усталостную прочность $K_{\text{обр}}$:

$$K_{\text{обр}} = \frac{\sigma_{R_{\text{обр}}}(\tau_{R_{\text{обр}}})}{\sigma_R(\tau_R)}, \quad (5.8)$$

где $\sigma_{R_{обр}}(\tau_{R_{обр}})$ – предел выносливости образца после предварительной обработки, МПа.

По результатам испытаний на малоцикловую усталость строят кривую усталости в двойных логарифмических координатах: "амплитуда полной деформации ε_a – число циклов до усталостного повреждения N_n или до разрушения образца N'' " (рис. 5.9).

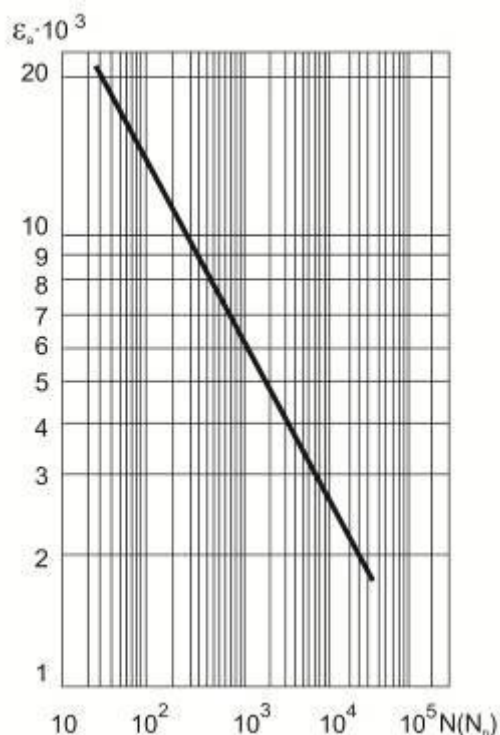


Рис.5.9 – Кривая усталости для упруго-пластической малоцикловой области в координатах $\lg \varepsilon_a - \lg N(N_n)$.

Оценивая направления развития методики усталостных испытаний, следует отметить, что при испытании образцов не всегда удается обеспечить соответствие условиям эксплуатации. В образце трудно создать такие же, как и в детали, уровень и распределение остаточных напряжений, масштабные соответствия, изменение структуры от поверхности покрытия к основному металлу и т.д. Кроме того обычно наблюдается значительное рассеивание полученных результатов, поэтому самые достоверные и точные характеристики сопротивления усталости можно получить, испытывая

непосредственно деталь, максимально приблизив условия эксперимента к условиям эксплуатации.

Существует ряд причин, в силу которых в настоящее время нельзя по имеющимся типовым методикам без экспериментальных испытаний рассчитать характеристики сопротивления усталости деталей с поверхностным упрочнением и с покрытиями. Это связано, прежде всего, с анизотропией механических свойств по поперечному сечению и наличием остаточных напряжений в приповерхностных слоях основного металла и упрочненного слоя. При этом значительно усложняется картина напряженного состояния в упругой и упругопластической областях, а задача расчета характеристик сопротивления усталости даже для сравнительно простых деталей типа вал или пластина становится трудноразрешимой.

Сказанное не исключает возможности методов расчета усталостной прочности изделий с поверхностным упрочнением и покрытиями без экспериментальных испытаний. Можно полагать, что в ближайшее время будут предложены единые унифицированные расчетные методы (без испытаний). Об этом свидетельствует то обстоятельство, что уже разработаны стандартные (по ГОСТ 25.504) методы вычисления коэффициентов влияния поверхностного упрочнения на усталостную прочность после закалки токами высокой частоты, химико-термической обработки (азотирование, цементация, цианирование) поверхностного наклепа при обработке роликом и обдувке дробью.

5.2. Контактная усталость

5.2.1. Понятия и определения

Контактная усталость – это процесс накопления повреждений и разрушение поверхностных слоев материала под действием переменных контактных напряжений, вызывающих образование ямок выкрашивания (питтингов) или трещин и снижение долговечности. *Предел контактной выносливости* – это максимальное абсолютное значение напряжения цикла,

при котором еще не происходит контактно-усталостное разрушение до базы испытаний.

В зоне контактирования образца и контртела возникают нормальные и касательные напряжения. В отличие от нормальных напряжений, монотонно снижающихся по мере удаления от поверхности, касательные напряжения распределены более сложно. Кривая зависимости касательных напряжений от расстояния до поверхности имеет максимум. Продольные усталостные трещины, возникшие при контактном напряжении, обычно есть результат действия именно касательных напряжений.

Большую роль играют концентраторы напряжений. К поверхностным концентраторам напряжений, которые способствуют разрушению, относят поверхностные поры, трещины, образовавшиеся при шлифовании, глубокие риски, царапины. Весьма опасными поверхностными концентраторами являются, оксидные пленки, поровые каналы, граница "основной металл-покрытие". Особенно неблагоприятная ситуация складывается в случае совпадения подповерхностных концентраторов напряжений с зоной действия максимальных касательных напряжений. Поэтому при поверхностном упрочнении следует выбирать такую толщину слоя, при которой зона максимальных касательных напряжений не накладывалась бы на границу "основной металл-покрытие".

Появление ямок выкрашивания и трещин в результате воздействия переменных контактных напряжений наблюдается на рабочих поверхностях зубчатых колес, шариковых и роликовых подшипников качения, бандажей, рельсов, валков прокатных станов железнодорожных колес и др.

Рис кривая контактной выносливости

По полученным экспериментальным данным строят кривые контактной выносливости. Несмотря на то, что внешне по схеме нагружения контактные испытания отличаются от усталостных (например, при изгибе или

растяжении-сжатии), кинетика процесса (постепенное накапливание повреждений – образование трещин – рост трещин – разрушение), оценочные характеристики (предел выносливости) и отрицательная роль концентраторов напряжений у них аналогичны.

5.2.2. Образцы, оборудование, испытания

Особое внимание следует обратить на качество поверхности образцов после шлифования. Не должно быть трещин, сколов, отслоений, прижогов и других дефектов. Число образцов определяют по ГОСТ 25.501 с учетом числа выбранных уровней напряжений. При испытаниях плоских образцов по схеме "пульсирующий контакт" один и тот же образец можно использовать многократно, смещая каждый раз точку приложения контакта. Для построения кривой контактной усталости и определения предела контактной выносливости число образцов в этом случае значительно меньше, чем при стандартных испытаниях: четыре – шесть, вместо тридцати – сорока.

ГОСТ 25.501 устанавливает четыре схемы нагружения: качение без проскальзывания (обкатка образца между двумя контртелами), качение с проскальзыванием, качение с внешней касательной нагрузкой, пульсирующий контакт. Последняя схема показана на **рис. 5.10**.

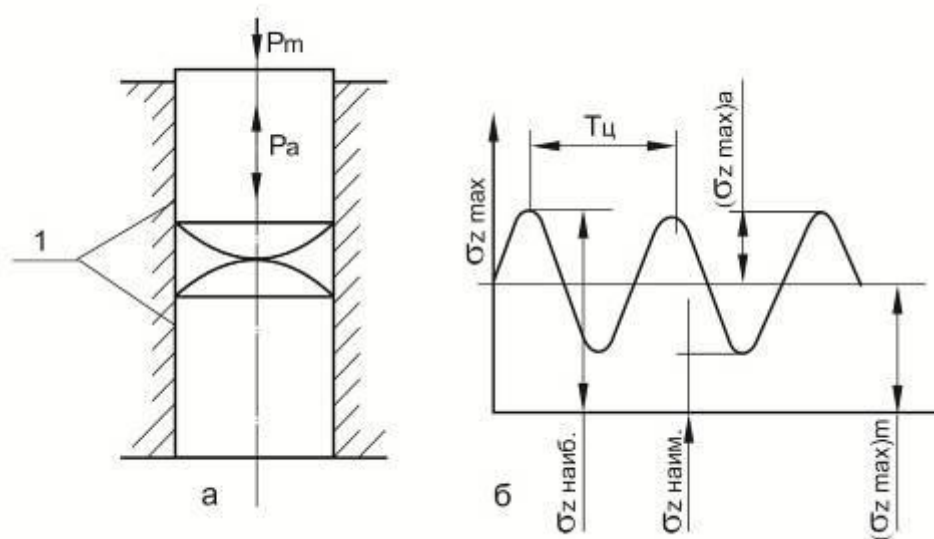


Рис. 5.10. – Схема испытаний при пульсирующем контакте: а – схема нагружения; б – цикл напряжений; 1 – образцы; $T_{ц}$ – период цикла; P_a – амплитуда нормальной нагрузки; P_m – средняя нормальная нагрузка.

Для реализации первой и третьей схем установлен базовый стенд типа МКВ-КМ (рис. 5.11) позволяющий нагружать образец с достаточно высокой частотой, автоматически фиксировать момент его разрушения (появление питтингов определенной величины) и выключать при этом машину.

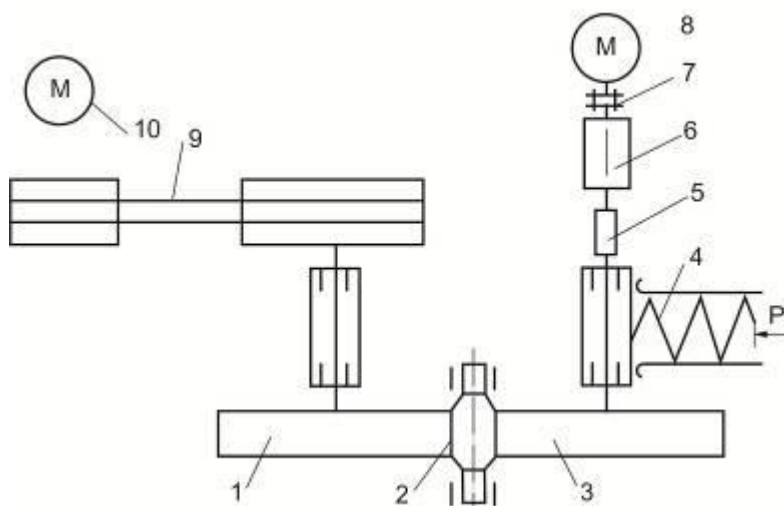


Рис. 5.11 – Испытательная машина типа МКВ-КМ: 1 – ведущее контртело; 2 – образец; 3 – ведомое контртело; 4 – пружинный механизм; 5 – тензометрическая балочка; 6 – токосъемник; 7 – упругая втулочно-кольцевая муфта; 8 – электродвигатель постоянного тока; 9 – клиноременная передача; 10 – электродвигатель переменного тока.

От электродвигателя 10 переменного тока через клиноременную передачу 9 и ведущее контртело 1 вращение передается по принципу фрикционной передачи к образцу 2 и ведомому контртелу 3. Нормальная P и касательная T нагрузки задаются соответственно пружинным механизмом 4 и торможением ведомого контртела от электродвигателя постоянного тока 8, работающего в режиме динамического торможения. Изменяя ток в обмотке возбуждения, можно варьировать тормозной момент, который передается через упругую втулочно-пальцевую муфту 7 к валу ведомого контртела. Для

измерения тормозного момента служит тензометрическая балочка 5 с наклеенными тензодатчиками и токосъемник 6. Деформация тензометрической балочки вследствие передачи тормозного момента вызывает появление электрического сигнала, пропорционального внешней касательной нагрузке. Максимальные нормальная и касательная нагрузки, задаваемые на стенде МКВ-КМ, равны соответственно 2 кН и 50 Н. Серийные машины трения СМТ-1 и СМЦ-2 подходят для испытаний по схеме "качение с проскальзыванием".

ГОСТ 25.501 рекомендует для схемы нагружения "пульсирующий контакт" гидропульсационные и резонансные усталостные машины. При испытаниях хорошо зарекомендовала себя установка, в которой реализовано пульсирующее контактное нагружение образцов с рабочими поверхностями "шар-поверхность" (рис. 5.12). От электродвигателя 1 через муфту 2 вращение передается на вал 17, установленный на двух опорах 3 с подшипниками качения. На валу на шпонке закреплен эксцентрик 4. Поступательное движение от эксцентрика через толкатель 5 передается на шток 7, перемещающийся в подшипнике скольжения.

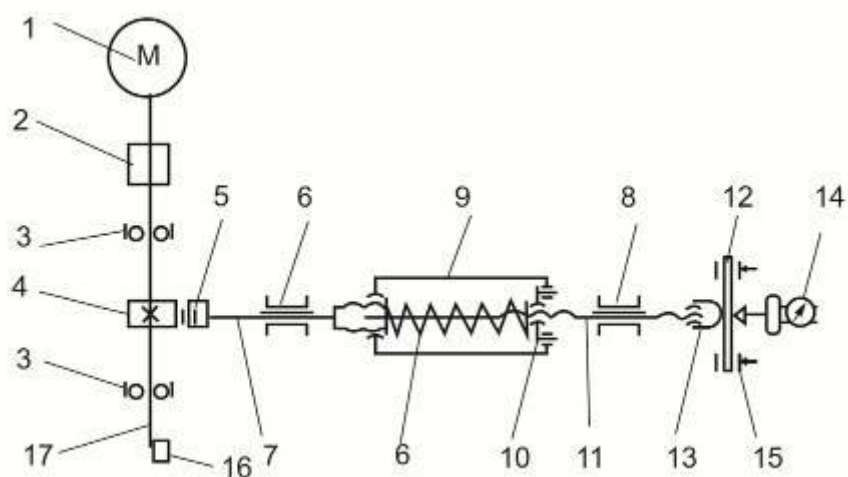


Рис. 5.12 – Установка для испытаний по схеме "пульсирующий контакт" на плоских образцах: 1 – электродвигатель; 2 – муфта; 3 – опоры

качения; 4 – эксцентрик; 5 – толкатель; 6 – опоры скольжения; 7 – шток; 8 – пружина; 9 – стакан; 10 – гайка; 11 – шток; 12 – образец; 13 – индентор; 14 – динамометр; 15 – рамка; 16 – счетчик; 17 – вал.

На конце штока – резьба, на которую навинчивается регулирующий стакан 9. На штоке устанавливается нагружающая пружина 8, жесткость которой регулируется стаканом 9 и гайкой 10. Шток 11 находится в подшипнике скольжения и передает движение от кулачка через толкатель, шток и пружину на индентор 13.

Образец 12 вставляют в рамку 15 и жестко крепят в ней при помощи винтов. Усилие пружины определяют динамометром 14 после снятия образца. Число циклов нагружения определяют по счетчику 16.

Схему нагружения выбирают наиболее близкой к условиям эксплуатации изделия. Назначают базу испытаний и нагрузку. База испытаний должна быть в 2–3 раза больше абсциссы точки перегиба кривой контактной усталости и лежать в интервале 10^7 – $5 \cdot 10^8$ циклов. Мерой числа циклов нагружения являются твердость образца и наличие горизонтального участка на кривой контактной усталости.

Критерием разрушения для схем качения является появление на рабочей поверхности ямок выкрашивания. Для схемы "пульсирующий контакт" за момент разрушения принимается момент появления усталостных трещин у контура пятна контакта. Ямки выкрашивания и трещины фиксируют либо специальной аппаратурой, рекомендованной ГОСТ 25.501, либо с помощью лупы Бринелля.

При испытании обычно сложно обнаружить первую микротрещину. Поскольку стандарт допускает использовать в исследовательских испытаниях различные критерии разрушения, то для схемы "пульсирующий контакт" рекомендуется строить график (рис. 5.13) в координатах " D_{II} -- N ", где D_{II} – диаметр пятна контакта, мкм; N – число циклов нагружения. В момент ускорения питтингообразования (начало третьей стадии развития

разрушения) наблюдается резкое увеличение пятна контакта, что означает начало усталостного разрушения при данном напряжении.

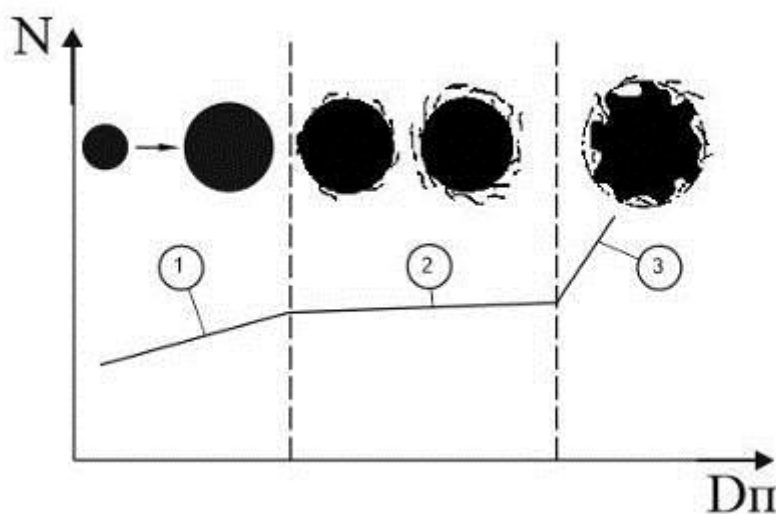


Рис. 5.13 – Схема развития разрушения при испытаниях по схеме "пульсирующий контакт" на плоских образцах: 1 – упругопластическая деформация; 2 – накопление усталостных повреждений; 3 – контактно-усталостное разрушение.

При исследовании плоских образцов по схеме "пульсирующий контакт" для выявления кинетики контактно-усталостного разрушения целесообразно делать снимки структур на поперечных шлифах.

По полученным экспериментальным данным и результатам вычислений строят кривую контактной усталости в полулогарифмических " $\sigma_{\text{наиб}} - \lg N$ " или в двойных логарифмических " $\lg(\sigma_{\text{наиб}}) - \lg N$ " координатах. Долговечность N выражают числом циклов до появления поверхностного усталостного повреждения или до базового числа циклов.

На кривой контактной усталости (по расположению горизонтальной ветви) определяют предел контактной выносливости (σ_R) МПа.

5. 3. Малоцикловая усталость: термическая и при термомеханическом нагружении

5.3.1. Понятия и определения

Малоцикловая усталость при термомеханическом нагружении – накопление повреждений и разрушение в результате циклического упругопластического деформирования, сопровождаемого изменением температуры. *Малоцикловая термическая усталость* – частный случай малоцикловой термомеханической усталости, при котором нагружение обусловлено стеснением тепловых деформаций при циклическом нагреве – охлаждении.

По характеру воздействия на сопротивление рассматриваемой малоцикловой усталости образцов все факторы делят на внешние и внутренние. К внешним при термической усталости относят: температуру образца, максимальную и минимальную температуры цикла, размах температуры, частоту и число циклов термического нагружения. Для малоцикловой усталости при термомеханическом нагружении дополнительными внешними факторами являются закон механического нагружения (функция, характеризующая изменение нагрузок во времени); цикл нагружений (деформаций); частота, период, максимальные, средние и минимальные нагружения (деформации) цикла и т.д. Внутренние факторы: структура металла, его модуль Юнга, ТКЛР, предел упругости, пористость.

В энергетических установках вследствие термомеханической и термической усталости разрушаются газовые трубопроводы, детали роторов и корпусов турбин, камеры пароперегревателей и другие ответственные узлы и детали. На поверхностях многих деталей металлургического оборудования появляются трещины, вызванные либо циклическими изменениями температуры, либо совместным влиянием механического нагружения и температуры. По этой причине часто выходят из строя ножи и диски пил горячей резки, штампы горячей объемной штамповки, валки, пропуски и

проводки станов горячей прокатки, хоботы завалочных машин. После образования трещины изменяются условия теплообмена между деталью и окружающей средой (воздухом, охлаждающей водой, печной атмосферой). Количество тепла, аккумулируемое деталью, возрастает, увеличивается также число и размер трещин, которые впоследствии пересекаются, образуя сетку. В результате отдельные участки рабочих поверхностей деталей выкрашиваются.

5.3.2. Малоцикловая термическая усталость

Методы испытаний термической и термомеханической усталости делят на качественные, количественные и натурные. При качественных методах образцы подвергают теплосменам без оценки деформаций и напряжений, возникающих при этом. Определяют только количество теплосмен до разрушения.

При натурных испытаниях в каждом конкретном случае, например, для материалов паропроводов, турбинных лопаток, штампов горячего деформирования применяют методику, имитирующую условия работы детали при эксплуатации. Такие исследования на лабораторных стендах позволяют оценить работоспособность конструкции, выбрать наиболее подходящий материал, разработать технологию термической обработки, повышающую теплостойкость. Вместе с тем они носят частный характер, не позволяют выявить закономерности влияния различных факторов и сопоставить результаты исследований.

Количественные методы дают возможность анализировать термоусталостное разрушение с учетом значений температурных напряжений и деформаций. Л.Коффин установил зависимость, связывающую деформацию и число циклов до разрушения

$$\Delta \varepsilon_{пл} = N^m \cdot D, \quad (5.9)$$

где: $\Delta \varepsilon_{пл}$ – изменение пластической деформации за цикл;

N – число циклов до разрушения;

m и D – постоянные.

Позднее было выявлено непостоянство условий деформирования в зависимости от числа циклов и влияние ряда других факторов на величину деформации, а также характер ее протекания. Поэтому необходимо регистрировать значение деформаций непосредственно в процессе испытаний. Результаты испытаний представляют в виде кривой термической усталости в координатах $\lg \Delta \varepsilon_{\max} - \lg N$, где $\Delta \varepsilon_{\max}$ – максимальное изменение величины пластической деформации.

Л. Б. Гецов рассмотрел типовые конструктивные формы образцов для испытаний, получившие наибольшее распространение (рис. 5.14).

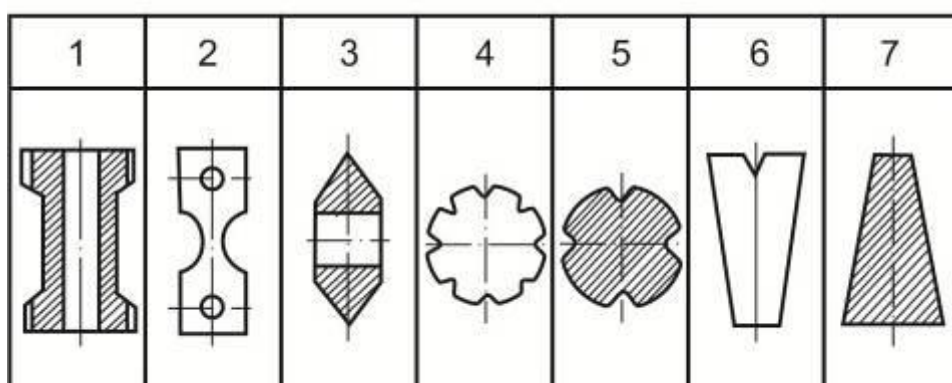


Рис.5.14 – Типы образцов для испытаний на термоусталость: 1 – образец Коффина (трубчатый); 2 – плоский корсетный; 3 – дисковый; 4 – диск с концентраторами; 5 – цилиндр с канавками; 6 – плоский с концентратором; 7 – клиновидный.

Образцы типов 3–7 позволяют моделировать напряженное состояние и условия разрушения деталей, близких по форме и конфигурации. Однако термические напряжения в таких образцах изменяются со временем не только под влиянием температуры, но и зависят от сечения образцов. Особый характер взаимодействия статических напряжений, вызывающих ползучесть, и усталостных делает достаточно сложным расчет напряжений и деформаций

и вносит неопределенность в получаемые результаты. Поэтому такие образцы нельзя использовать для построения кривых термической усталости.

В образцах типов 1, 2 при жестком креплении концов напряжения, обусловленные термоциклированием, в данный момент времени постоянны во всех точках рабочей части. В пустотелых образцах типа 1 из-за малой толщины стенки нагрев даже с высокими скоростями не приводит к неоднородности температурного поля и различию вследствие этого уровня напряжений.

Образцы типа 1 используют в установках Коффина (рис. 5.15) для выбора наиболее стойкого в условиях теплосмен материала и разработки технологии упрочняющих обработок. В установках Коффина образцы с толщиной стенок 0,2–1,0 мм закреплены во фланцах 3. Жесткость конструкции обеспечивается опорными колонками 1. Образец 2 нагревают электрическим током через токоподводящие шины 4. Охлаждение ведется сжатым холодным воздухом, подаваемым в отверстие образца. Нагрев и охлаждение чередуются с заданной периодичностью. Индикаторы 6 часового типа или наклеенные тензодатчики показывают деформацию опорных колонок. К средней части образца приваривают термопару, которая контролирует заданные максимальную и минимальную температуры испытаний. Определяют количество теплосмен, приведших к образованию сквозной трещины в рабочей части образца.

Влияние упрочняющих технологий на эксплуатационные характеристики жаропрочного сплава, применяемого при изготовлении лопаток газовых турбин, на установке Коффина изучали С.З. Бокштейн с сотр. Строили кривые термической усталости. Для выявления характера разрушения оценивали изломы и проводили металлографический анализ микрошлифов продольного сечения. Был показан сложный характер влияния нагружения на надежность и выявлена роль покрытия в разрушении.

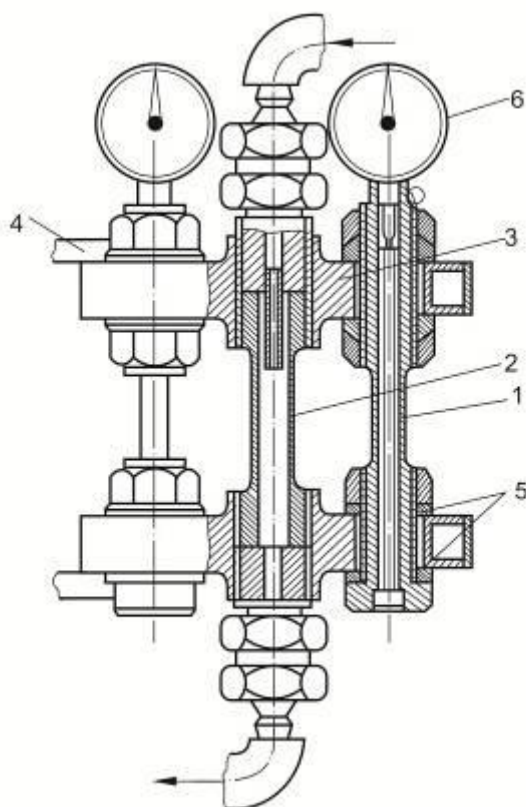


Рис. 5.15 – Схема установки Коффина для испытаний на термоусталость трубчатых образцов: 1 – опорные колонки; 2 – образец; 3 – крепежные фланцы; 4 – токоподводящие шины; 5 – изоляторы; 6 – индикаторы часового типа.

Установка Коффина, обладая рядом достоинств, обуславливающих ее широкое применение, не позволяет фиксировать структурные изменения, происходящие в материале при термоусталостном нагружении, следить за появлением и развитием микротрещин непосредственно в процессе испытаний. Л.Б. Гецов разработал метод непрерывного микроструктурного исследования повреждений в металлах при термической усталости. Предложенный метод вакуумной металлографии выгодно отличается от других возможностью прямого непрерывного наблюдения за микроструктурными изменениями и за кинетикой трещинообразования.

Многие детали газовых турбин выдерживают в процессе работы не только тысячи циклов термической усталости, но и одновременное воздействие циклических и статических механических нагрузок. Для

прогнозирования работы ответственных деталей в таких экстремальных условиях служит методика исследования малоциклового усталости при термомеханическом нагружении.

5.3.3. Усталость при термомеханическом нагружении

Испытания при *термомеханическом нагружении*, регламентируемые ГОСТ 25.505, возможны при температурах до 1100 °С при числе циклов растяжения--сжатия до 10^5 в малоцикловой упругопластической области. ГОСТ 25.505 устанавливает четыре типа образцов: трубчатые цилиндрические, сплошные цилиндрические, трубчатые корсетные, сплошные корсетные. Геометрия и размеры головок для крепления образцов выбирают произвольно по схеме испытаний и из конструкции применяемого оборудования. Образцы испытывают на универсальных машинах для статического нагружения. Машина должна иметь прибор для измерения деформации (оптический, тензометрический) и нагревательные устройства. Образцы деформируют и нагревают при меняющихся от цикла к циклу максимальных и минимальных деформациях и постоянной температуре в течение всего процесса испытаний.

Продолжительность испытаний выбирают с учетом условий работы изделия. Она должна составлять не менее 10 % эксплуатационного временного ресурса. Другие условия испытаний (форма цикла нагружения и температура нагрева и т.д.) рекомендуется назначать близкими к реальным. В процессе термомеханического нагружения одним из известных способов измеряют продольную деформацию.

Образцы испытывают до момента появления трещины размером 5–10 % от его диаметра. Рабочие поверхности контролируют визуально через определенные промежутки времени без съема образцов с испытательной машины.

5.4. Ударно-циклическая усталость

Ударно-циклическое нагружение отличается от циклического рядом особенностей, связанных с формой цикла нагружения, скоростью приложения и распространением в объеме детали упругих волн ударной нагрузки. Обычно продолжительность ударных импульсов составляет несколько микросекунд, при этом амплитуда нагрузки может составлять десятки тысяч Ньютонов (рис 5.16).

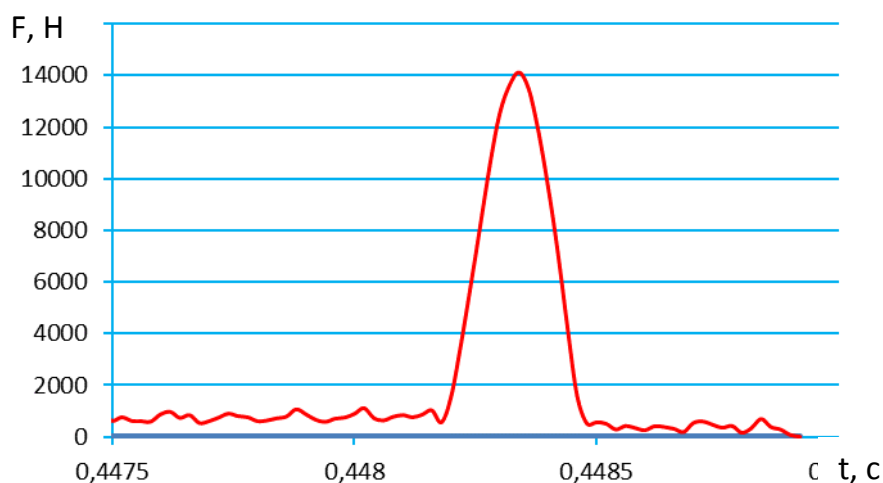


Рисунок 5.16– Осциллограмма ударного импульса

Для проведения ударно-усталостных испытаний используют установки пневматическим, механическим и электромагнитным приводом. Установки электромагнитного типа имеют ряд преимуществ. Они обладают высокой надежностью, компактностью, широким диапазоном изменения параметров нагружения, быстротой переналадки и легкостью управления. Кроме того, минимальное количество подвижных частей обеспечивают длительный ресурс эксплуатации при сохранении стабильных рабочих параметров. На рисунке 5.17 приведена схема специальной установки, которая позволяет реализовать две схемы нагружения: ударно-циклическое сжатие и изгиб. Первая из этих схем используется для определения живучести образцов с надрезами, вторая — для построения кинетических диаграмм ударно-усталостного разрушения. Установка состоит из следующих основных узлов (рис. 5.17):

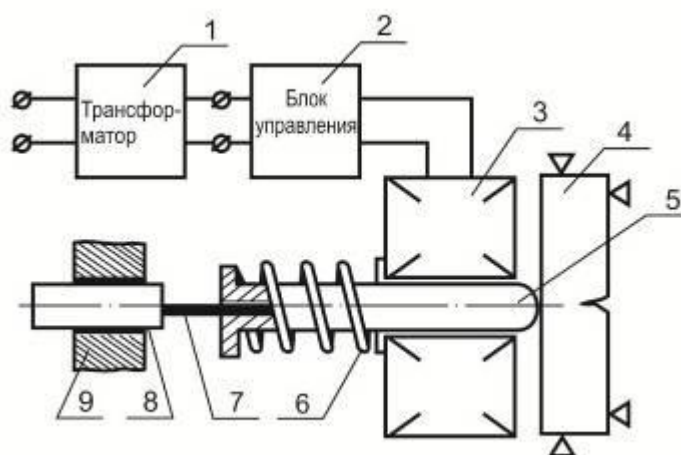


Рис. 5.17 – Схема установки для испытания материалов при ударно-циклическом нагружении: 1 – трансформатор; 2 – блок управления; 3 – электромагнитная катушка; 4 – образец; 5 – ударник; 6 – возвратная пружина; 7 – направляющая ось; 8 – регулируемый задний упор; 9 – опора.

Принцип работы установки следующий. Питающее напряжение через трансформатор и блок управления подается на электромагнитную катушку, которая втягивает в себя сердечник (ударник), наносящий удар по образцу. При снятии питания с катушки блоком управления ударник возвращается в исходное положение под действием возвратной пружины. Направляющая ось служит для центровки ударника и уменьшения износа внутренней поверхности электромагнитной катушки. Блок управления представляет собой тиристорный преобразователь частоты и позволяет испытывать материалы с частотой нагружения от 10 до 600 ударов в минуту. Важнейшими характеристиками установки являются сила и энергия удара. Изменение силы и энергии удара может осуществляться: изменением питающего напряжения с помощью трансформатора, изменением исходного положения ударника с помощью подвижного заднего упора, применением катушек с различными диаметрами провода и количеством витков, а также диаметрами сердечников. Так, при использовании катушки с диаметром сердечника 14 мм сила удара может составлять от 60 до 450 кгс с

максимальной энергией удара 2 Дж. Применение электромагнитных катушек с другими параметрами позволяет получать максимальную энергию удара до 10 Дж.

В ходе испытаний оцениваются характеристики долговечности образцов и скорость роста усталостных трещин. При испытании по схеме ударно-циклического сжатия сравнение различных марок сталей и оценка эффективности режимов их термического упрочнения осуществляется по критерию долговечности (количеству циклов нагружения до полного разрушения до образца). Сопротивление росту усталостной трещины в материале оценивалось, а так же фиксацией времени до момента зарождения трещины.

Описанные методики исследования трещиностойкости позволили изучить процессы разрушения комбинированно упрочненных сталей с износостойкими покрытиями и оптимизировать термическую обработку перспективных сталей.

Список литературы

1. Гецов Л. Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. – Л.: Машиностроение, 1973. – 296 с.
2. Горицкий В. М., Терентьев В. Ф. Структура и усталостное разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1980. – 207 с.
3. Горицкий В.М. Диагностика металлов. - М.: Металлургиздат, 2004. - 408 с.
4. Иванова В. С., Терентьев В. Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 455 с.

5. Чаевский М. И., Шатинский В. Ф. Повышение работоспособности сталей в агрессивных средах при циклическом нагружении. – Киев: Наукова думка, 1970. – 310 с.
6. Москвичев В.В., Махутов Н.А., Черняев А.П. и др. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов. - Новосибирск: Наука, 2002. - 334 с.
7. Терентьев В.Ф., Колмаков А.Г. Механические свойства металлических материалов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. - 120 с.
8. Campbell F.C. Fatigue and Fracture: Understanding the Basicsю. - OH: ASM International. - 525 p.
9. Manson S.S., Halford G.R. Fatigue and Durability of Metals at High Temperatures Materials Park. - OH: ASM International, 2009. – 278 p
10. Stephens I., Fatemi A., Stephens R.R., Fuchs H.O. Metal Fatigue in Engineering. - New York: John Wiley & Sons, 2001. - 472 p.

6. Трещиностойкость

6.1. Общие сведения о трещиностойкости

Измеряемые значения предела прочности, по достижении которого конструкции разрушается, оказываются значительно меньше, чем результаты теоретических расчетов, основанных на оценке энергии межатомных связей. Это расхождение может быть объяснено присутствием, микроскопических дефектов или трещин, которые всегда существуют на поверхности или в объеме материала. Существование таких дефектов приводит к падению прочности потому, что приложенное напряжение усиливается или концентрируется на вершинах трещин, причем степень концентрации напряжений зависит от ориентации трещины и ее геометрической формы.

В практику расчётов на прочность вошло понятие «концентрация напряжений». Это - число, показывающее, во сколько раз местные напряжения превышают номинальные. Концентрация напряжений определяется формой и размерами дефекта (выреза, трещины, поры и т. д.). и свойствами материала. Самая опасная ситуация возникает у острых трещин в хрупких материалах.

Рассмотрим конструкцию, в которой есть трещина. Под воздействием циклической нагрузки величина напряжений в вершине трещины может превышать предел прочности материала и трещина начнет расти. Чем длиннее трещина, тем большую концентрацию напряжений она вызывает. Это означает, что скорость развития трещины с течением времени будет увеличиваться. Из-за наличия трещины прочность конструкции уменьшается; она становится меньше, чем исходная прочность, на которую была рассчитана. Через некоторое время прочность настолько уменьшится, что конструкция уже не будет способна выдержать пиковые (случайные высокие) нагрузки, которые могут возникнуть при эксплуатации. С этого момента конструкция легко разрушается. Если пиковые нагрузки не возникают, то

трещина продолжает расти до тех пор, пока прочность не становится столь низкой, что разрушение происходит при нормальных эксплуатационных нагрузках.

Неупрочненные сплавы при напряжениях выше предела текучести испытывают пластическую деформацию. Поэтому у сплавов в окрестности вершины трещины всегда имеется пластически-деформированная область. Эту область называют пластической зоной при вершине трещины. Эффект концентрации напряжений более существенен для хрупких, чем для пластичных материалов. Если максимальные напряжения превысят предел текучести в пластичных материалах, то возникнут пластические деформации. Это приведет к более равномерному распределению напряжений в окрестностях концентратора напряжений, что будет способствовать снижению максимального напряжения по сравнению с его ожидаемым теоретическим значением. Такое поведение и перераспределение напряжений вокруг трещин и разрывов сплошности не происходит в хрупком материале, так что максимальное напряжение будет отвечать своему теоретическому значению.

Поэтому в расчётах на прочность элементов конструкций и сооружений с трещинами отправной точкой является исследование распределения напряжений и деформаций, возникающих в них под действием приложенных нагрузок. Особый интерес представляет область в непосредственной близости к вершине трещины.

Трещиностойкость (вязкость разрушения) – способность материала сопротивляться развитию трещины при механических и других воздействиях.

Оценка качества только по показателям прочности и пластичности в настоящее время недостаточна для определения надежности материала при его эксплуатации. Общая закономерность при проведении большинства видов упрочняющих обработок заключается в одновременном падении трещиностойкости с ростом прочности материала. Таким образом, эти

важнейшие показатели конструктивной прочности находятся между собой в противоречии: если идти по пути увеличения прочности, то падает надежность материала, если же увеличивать надежность (уменьшая тем самым прочность материала), то существенно возрастает материалоемкость конструкции. В связи с этим, задача, связанная с определением оптимальных уровней предела текучести и трещиностойкости, становится одной из наиболее сложных в современном материаловедении.

Для практических расчетов деталей машин и элементов конструкций характеристики трещиностойкости очень важны, так как по ним, задаваясь рабочим напряжением, можно определить критические размеры трещин, при которых происходит хрупкое разрушение, и наоборот, определив какими-либо методами дефектоскопии размеры и форму трещин, можно найти величину разрушающих напряжений.

Возможны три типа трещин, т.е. три схемы нагружения и смещений в зонах трещин (рис. 6.1).

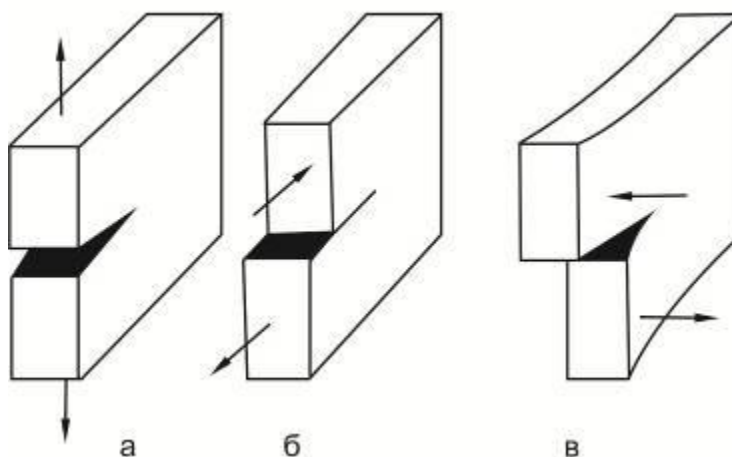


Рис. 6.1 - Модели трещин: а – отрыва (тип I); б – поперечного сдвига (тип II); в – продольного сдвига (тип III).

Все регламентированные стандартные испытания относятся к типу I – трещина отрыва.

Характеристики трещиностойкости могут быть использованы для следующих важных целей: расчетов надежности деталей и конструкций;

сопоставления различных вариантов технологических режимов упрочнения; нахождения оптимального сочетания состава и свойств материалов; обоснования выбора основного металла и материала покрытия при изготовлении конкретных деталей; анализа причин разрушения изделий.

На протяжении последних десятилетий делаются попытки улучшить методы оценки трещиностойкости на основе современных дислокационных представлений о кинетике распространения трещин. Сейчас можно считать, что испытания на трещиностойкость достаточно теоретически обоснованы и апробированы.

В первых работах по механике разрушения английский ученый А. Гриффитс показал, что противоречия между теоретическим сопротивлением разрушению и реальной трещиностойкостью могут быть объяснены наличием в материалах дефектов в виде трещин. Даже в случае незначительных нагрузок концентрация напряжений у вершин трещин может достигать значений когезионной прочности. Позднее Г. Ирвин получил данные, о том, что локальные напряжения в устье трещины при статическом нагружении пропорциональны коэффициенту интенсивности напряжений (K) – величине, определяющей напряженно-деформированное состояние и смещение вблизи вершины трещины для упругого тела, независимо от схемы нагружения, формы и размеров тела и трещины.

Коэффициент интенсивности напряжений связан с размерами трещины соотношением:

$$K = \sigma_C \sqrt{\alpha \pi l_T}, \quad (6.1)$$

где: σ_C – номинальное напряжение без учета трещины, МПа;

l_T – длина трещины, м;

α – коэффициент, зависящий от геометрии и формы тела.

При разрушении отрывом, в случае неустойчивого распространения трещины, коэффициент интенсивности напряжений достигает критического

значения K_C , которое в значительной степени определяется геометрией образца (прежде всего толщиной). При некоторых толщинах образцов у вершин трещин наблюдается смена плосконапряженного состояния на плоскодеформированное. Последнее весьма опасно, так как может привести к неожиданному хрупкому разрушению без признаков пластической деформации. Коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} при таких условиях можно рассматривать как характеристику материала.

Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} есть силовая характеристика трещиностойкости для модели трещины типа I при предельном стеснении пластических деформаций у вершин трещин. Зависимость K_C и доли хрупкого излома от толщины образца с трещиной показана на рис. 6.2.

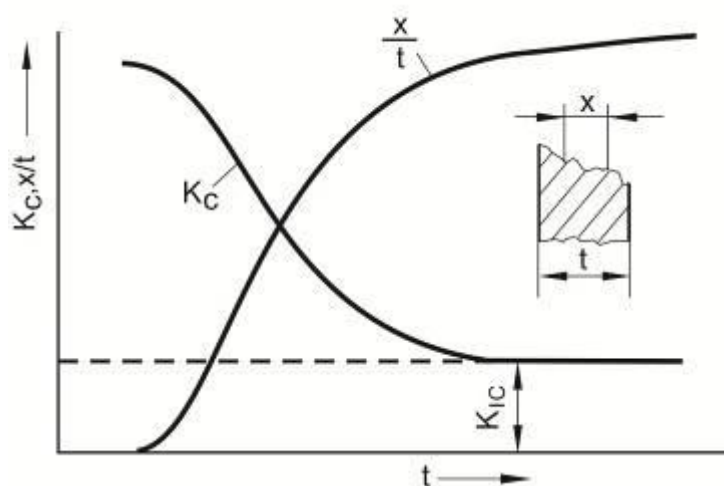


Рис. 6.2 - Изменение коэффициента интенсивности напряжений K_C и доли хрупкого излома x/t в зависимости от толщины образца с трещиной: t – толщина образца; x – ширина зоны плоского (хрупкого) излома образца.

Для плоских образцов при осевом и внецентренном растяжении, а также изгибе толщина образца t должна удовлетворять условию:

$$t \geq \beta \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{0.2}} \right)^2, \quad (6.2)$$

где: $\sigma_{0.2}$ – условный предел текучести испытуемого материала, МПа;

β – коэффициент.

Для сталей с пределом текучести ниже 800 МПа требования линейной механики разрушения, т.е. условия уравнения (10.2), выполняются только в случае использования крупномасштабных образцов. Вес их может достигать 1,5 т, а толщина 300 мм. Таким образом, из-за методических трудностей оценка трещиностойкости по K_{Ic} сложна для широко распространенных малоуглеродистых сталей.

Определять K_{Ic} малоуглеродистой стали на компактных лабораторных образцах для оценки трещиностойкости крупного изделия недопустимо. В случаях эксплуатации конструкции при низких температурах в соответствующих испытаниях можно определять K_{Ic} на образцах меньших размеров. При этом с понижением температуры испытаний предел текучести повышается, а K_{Ic} уменьшается. В соответствии с формулой (10.2) можно использовать образцы меньшей толщины.

Под смещением берегов трещины понимают изменение расстояния между двумя точками на противоположных берегах трещины в процессе нагружения. Раскрытие трещины – это смещение берегов непосредственно у вершины трещины. Раскрытие в вершине трещины – δ_c – является деформационным критерием разрушения и равняется раскрытию трещины при максимальной нагрузке, действующей на образец. Этот критерий определяет способность металла к пластической деформации в зоне трещины. Измеряют критическое раскрытие трещины с использованием специальных приспособлений, что сопровождается определенными методическими трудностями. Кроме того, в отличие от величины K_{Ic} – основной и постоянной характеристик материала, δ_c – лишь сравнительная

характеристика. Поэтому δ_C дает меньше информации о трещиностойкости исследуемого материала.

Необходимость распространить методы оценки трещиностойкости на сплавы с пределом текучести 400–800 МПа привела к разработке метода J -интеграла. Этот метод оценки основан на разработках Г.П. Черепанова и Д. Райса.

J -интеграл – величина, характеризующая работу пластической деформации и разрушения, а также поле напряжений и деформаций при упругопластическом деформировании вблизи вершины трещины (аналогично коэффициенту интенсивности напряжений K для упругого тела).

J -интеграл в отличие от K_{Ic} позволяет применять основные положения механики разрушения в области упругопластической деформации. По определению японского исследователя Т. Екобори J -интеграл -- энергия, поступающая в зону вершины трещины при увеличении трещины на единицу длины. J -интеграл выражается отношением уменьшения внутренней энергии du к изменению длины трещины dl

$$J = -\frac{du}{dl}. \quad (6.3)$$

При разрушении материала по законам линейной механики вводится параметр J_{Ic} -критический J -интеграл, который характеризует сопротивление материала началу распространения трещины независимо от вида разрушения. Энергетический критерий разрушения J_{Ic} связан с величиной K_{Ic} соотношением

$$J_{Ic} = \frac{1-\nu^2}{E} K_{Ic}^2, \quad (6.4)$$

где ν – коэффициент Пуассона;

E – модуль нормальной упругости.

Хорошая корреляция значений K_{Ic} , определенных на крупногабаритных образцах, и J_{Ic} , вычисленных при испытании компактных образцов с пересчетом по уравнению (10.4), показана в многочисленных работах.

Эксперименты и расчеты подтверждают, что J -интеграл не зависит от геометрии в гораздо более обширной области размеров, чем K_{Ic} и δ_C . Толщина образца, при которой может быть найдено значение J -интеграла, не зависящее от геометрических параметров образца, примерно в 50 раз меньше, чем толщина образца для определения K_{Ic} . При выборе толщины образца должно выполняться следующее условие:

$$t \geq \alpha \frac{J_{Ic}}{\sigma_{0.2} + \sigma_b}, \quad (6.5)$$

где: σ_b – временное сопротивление (предел прочности), МПа;

J_{Ic} – трещиностойкость в условиях плоской деформации Дж/м².

Это значительно менее жесткое условие, чем при определении K_{Ic} . Таким образом, совершенно очевидна целесообразность использования J -интеграла в качестве критерия трещиностойкости по сравнению с другими методиками.

По характеру прилагаемой при испытании нагрузки различают *статическую, циклическую и динамическую трещиностойкости* (рис. 6.3).

Трещиностойкость материалов



Критерии трещиностойкости



Рис. 6.3. Виды механических испытаний с определением трещиностойкости:

КИН—коэффициент интенсивности напряжений; КРТ—критическое раскрытие трещины

6.2. Статическая трещиностойкость

Как было показано выше, трещиностойкость для одного и того же материала существенно зависит от типоразмера образца, вида нагружения, условий испытания, характера напряженного состояния материала в области, где зарождается и распространяется трещина. Поэтому применяют стандартные методики исследования для возможности применения результатов для оценок условий разрушения реальных конструкций и сравнения результатов, полученных различными авторами.

ГОСТ 25.506 устанавливает методы испытаний на трещиностойкость металлов и охватывает все этапы эксперимента:

- выбор типоразмеров образца;
- применяемое оборудование;
- подготовка к испытаниям;
- методы проведения испытаний;
- обработка результатов.

Коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} , критическое раскрытие трещины δ_C или J -интеграл определяют на жестких машинах растяжения-сжатия, оснащенных специальными устройствами.

Форму и размеры образцов выбирают по ГОСТ 25.506 (рис. 6.4-6.7). Для определения характеристик трещиностойкости применяют следующие образцы: тип 1 - плоский прямоугольный с центральной трещиной для испытаний на осевое растяжение (рис. 6.4); тип 2 - цилиндрический с кольцевой трещиной для испытаний на осевое растяжение (рис. 6.5); тип 3 - прямоугольный компактный образец с краевой трещиной для испытаний на внецентренное растяжение (рис. 6.6); тип 4 - плоский прямоугольный образец с краевой трещиной для испытаний на трехточечный изгиб (рис. 6.7).

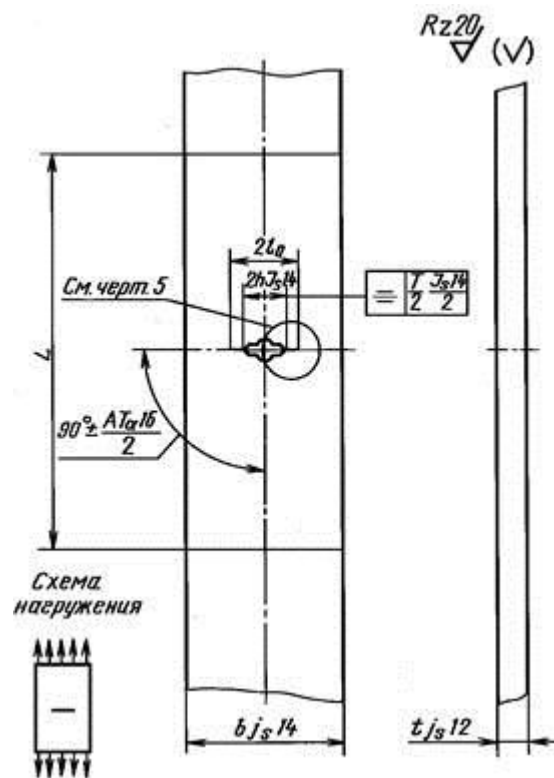


Рис. 6.4. Образец: тип 1 - плоский прямоугольный с центральной трещиной для испытаний на осевое растяжение, где L - расстояние между частями образца служащими для крепления в захватах

$$2h \gg (0,25 - 0,35)b; \quad 2l \gg (0,3 - 0,5)b;$$

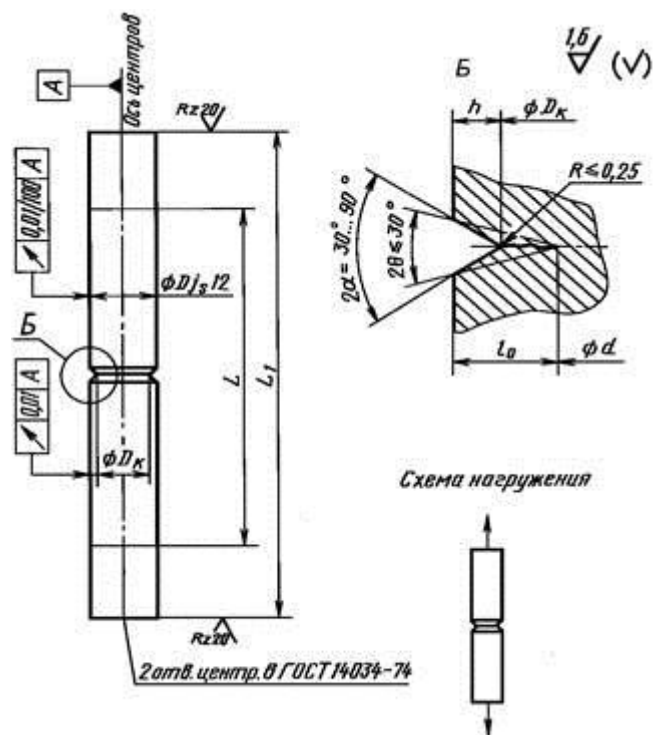


Рис. 6.5 Образец: тип 2 - цилиндрический с кольцевой трещиной для испытаний на осевое растяжение, где L - расстояние между частями образца, служащими для крепления в захватах.

$$L = 5D; d = (0,6 - 0,7)D;$$

$$l_0 = 0,5(D - d)^3 h + 1,5 \text{ мм}$$

$$D_K = D - 2h \approx (0,65 - 0,85)D$$

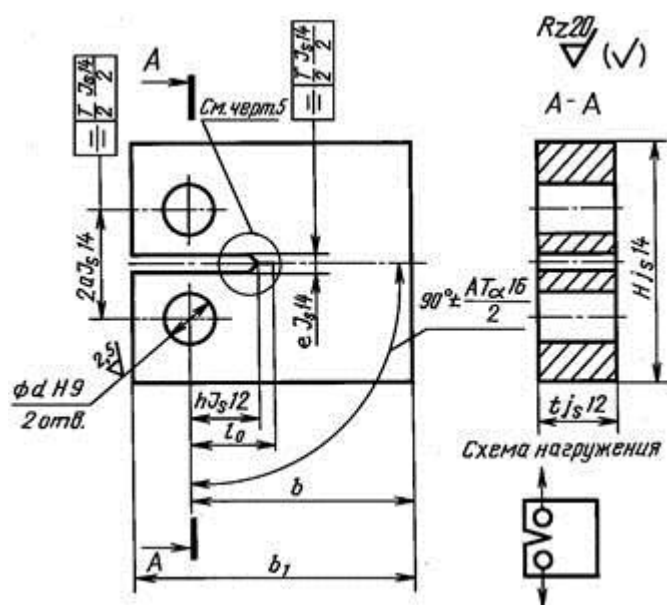


Рис. 6.6. Образец: тип 3 - прямоугольный компактный образец с краевой трещиной для испытаний на внецентренное растяжение.

$b = 2t$; $b_1 = 1,25b$; $H = 1,2b$; $2a = 0,55b$; $d = 0,25b$; $l_0 = (0,45 - 0,55)b$; $h \gg (0,35 - 0,50)b$

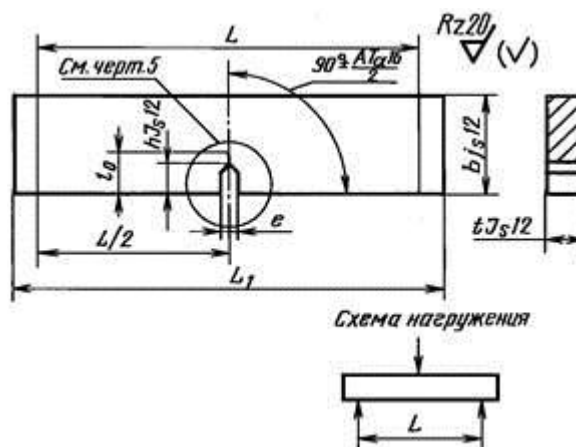


Рис. 6.7. Образец: тип 4 - плоский прямоугольный образец с краевой трещиной для испытаний на трехточечный изгиб, где L - расстояние между опорами.

$b = 2t$; $l_0 = (0,45 - 0,55)b$; $L = 4b$; $L_1 = 4b + 0,5b$; $h \gg (0,35 - 0,50)b$

Соотношение размеров и схемы нагружения образцов показаны на рис. 6.4-6.7. При этом ГОСТ 25.506 рекомендует следующие размеры образцов:

тип 1 ширина b не менее 50 мм;

тип 2 диаметр D не менее 12 мм;

тип 3 толщина t не менее 20 мм;

тип 4 толщина t не менее 10 мм.

В образцах типов 1 и 2 форму и размеры частей, служащих для крепления и нагружения, определяют после выбора конструкции захватов. Размер h назначают в зависимости от способа изготовления надреза и крепления образца так, чтобы он не разрушился в захватах. Иницирующий надрез в образце типа 2 показан на рис. 6.8, а в остальных - на рис. 5. Ориентация надреза в случае анизотропии механических свойств должна быть одинаковой для всех образцов при данных испытаниях. Для образцов типа 1 применяют надрезы вариантов 1а, 2а, 3 (рис. 6.5), для образцов типов 3 и 4 вариантов 1а и 2b. Надрез изготавливают с помощью специальных фрез (см. рис. 6.8, варианты 1а и 2b) или шлифовального круга (вариант 2b), пропиливанием от центрального отверстия (вариант 2а) или электроискровым способом (вариант 3). В отдельных случаях допускается комбинировать различные способы. Иницирующий надрез для образца типа 2 изготавливают на токарном станке с последующей шлифовкой. Для уменьшения нагрузки и времени, необходимых для зарождения трещин, можно применять лазерную, электронно-лучевую и другие обработки вершины надреза при условии, что область нарушенного состояния исходного материала у вершины надреза будет меньше длины создаваемой исходной усталостной трещины.

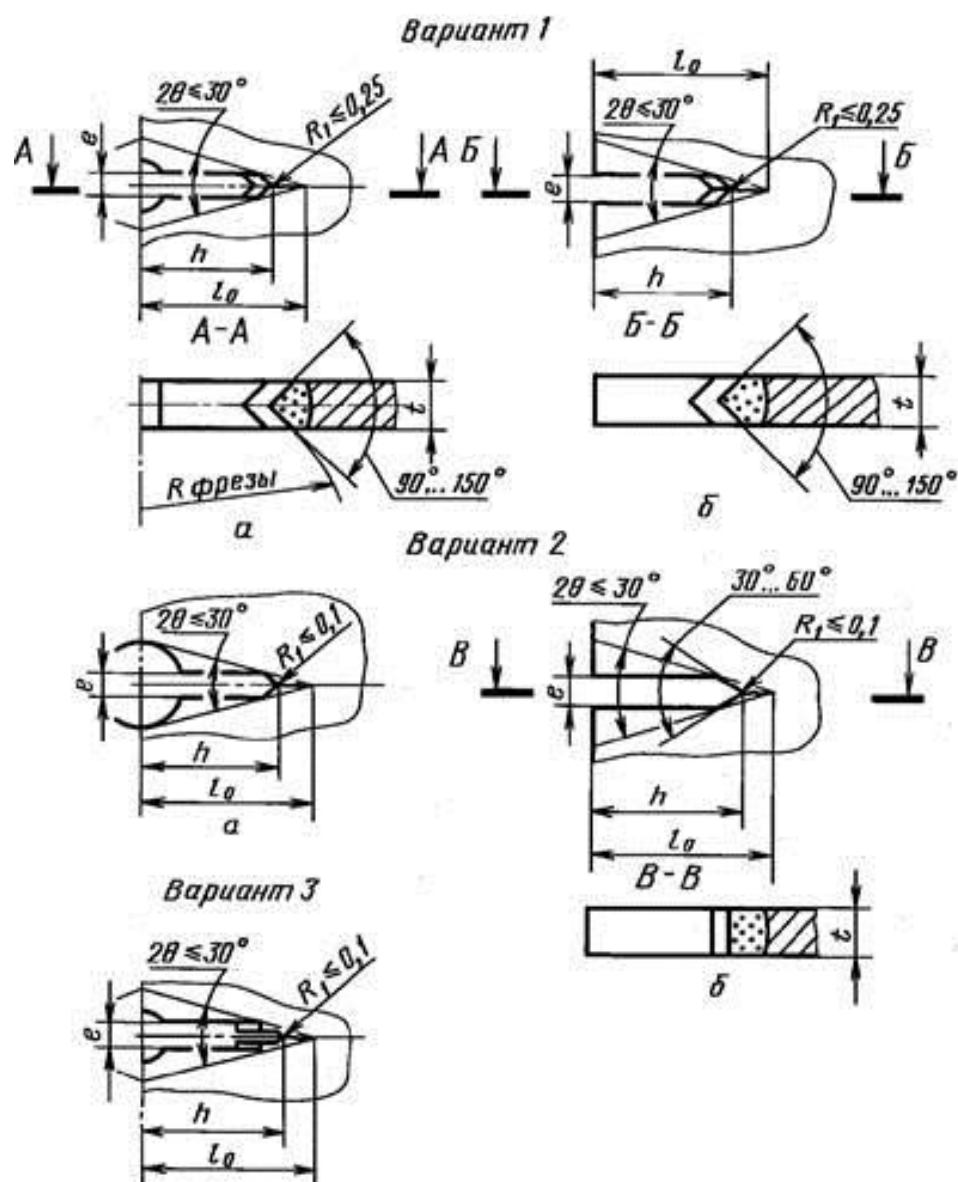


Рис.6.8. Иницирующие надрезы в образцах типа 1 и 3-5

При вырезке и изготовлении образцов необходимо обеспечить минимальные наклеп, остаточные напряжения, а также изменения структуры и фазового состава в зоне разрушения образца. Окончательную механическую обработку образцов и нанесение исходной усталостной трещины проводят после термической обработки образцов. Подготовка образцов к испытаниям заключается в нанесении концентраторов напряжений и наведении усталостных трещин. Рекомендации по конструкциям приспособлений для крепления и нагружения образцов при нанесении усталостных трещин даны в приложении ГОСТ 25.506. Для облегчения контроля длины усталостной трещины при ее выращивании боковые поверхности образцов целесообразно отполировывать. Эффективным концентратором, облегчающим зарождение усталостной трещины, является надрез, выполненный на электроискровом станке

проволокой диаметром 0,1–0,15 мм. Усталостные трещины выращивают из устья надрезов на специальных машинах. Усталостные трещины в плоских образцах типов 1, 3 и 4 (см. рис. 6.4, 6.6, 6.7) наносят при переменном растяжении с коэффициентом асимметрии цикла $R = 0,1 - 0,2$, а в образцах типа 2 - при круговом изгибе ($R = -1$). При этом регистрируют минимальные и максимальные усилия цикла и число циклов. Рекомендованное число циклов нагружения при нанесении усталостной трещины - не меньше 5×10^4 .

Для измерения смещений v или прогибов f применяют двухконсольные датчики тензорезисторного типа. Захватные части датчиков, способы их установки на образцах и размеры элементов датчиков в зоне их крепления приведены на рис. 6.9.

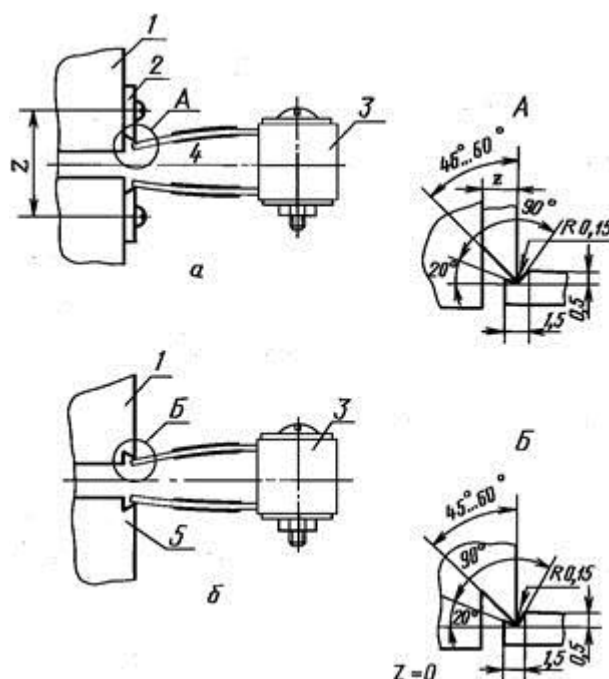


Рис.6.9. Датчики, способы их установки на образцах и размеры элементов датчиков в зоне их крепления: 1 - образец; 2 - накладные опорные призмы; 3 - датчик смещения; 4 - плоскость надреза; 5 - призматические выступы

Установку датчиков смещения на образцах типов 1 - 4 проводят с помощью накладных опорных призм (рис. 6.9а). На образцах типов 3 и 4 допускается установка датчиков на призматических выступах, изготовленных на торцах образцов (рис. 6.9б).

Одна из схем нагружения плоских призматических образцов на испытательном комплексе изображена на рис. 6.10.

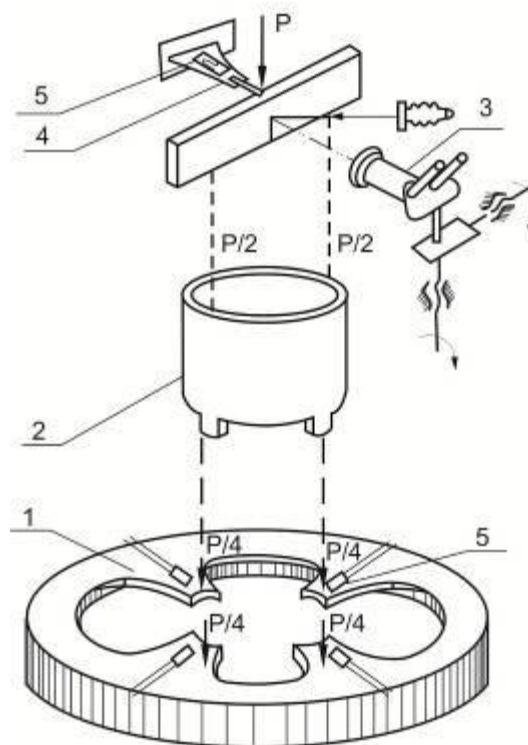


Рис. 6.10 – Схема испытания на трещиностойкость плоских образцов с надрезом и трещиной: 1 – упругий элемент усилия; 2 – промежуточное кольцо; 3 – микроскоп; 4 – упругий элемент прогиба; 5 – тензодатчик; P – усилие.

Образцы нагружают по схеме трехточечного изгиба. Усилие, приложенное к образцу, передается через кольцо на четырехлепестковый упругий элемент и с помощью тензодатчиков преобразуется в электрический сигнал, который через тензометрический усилитель поступает на координату "Y" двухкоординатного самопишущего прибора. Показания тензодатчика нагрузки тарируются с помощью динамометра сжатия. Прогиб образца в точке приложения силы фиксируется тензодатчиком, наклеенным на упругую пластину. Тарируется датчик с помощью микрометрического глубиномера с точностью $\pm 0,01$ мм. Микроскоп служит для визуального контроля за процессом разрушения.

Диаграммы разрушения образцов, построенные в координатах, "сила P – перемещение точки приложения нагрузки f или прогиб V_f " – позволяют

получить P_Q – расчетную нагрузку, необходимую для вычисления коэффициентов интенсивности напряжений по формуле:

$$K_Q = \frac{P_Q}{t\sqrt{b}} Y, \quad (6.6)$$

где b – ширина образца;

Y – безразмерная функция, зависящая от отношения глубины трещины к ширине образца.

Численные значения функций Y приведены в ГОСТ 25.506. K_Q можно принять за K_{Ic} лишь тогда, когда выполняется условие (10.2). В противном случае необходимо увеличить толщину образцов и повторить испытания.

При определении значений J -интеграла на плоских призматических образцах используют то же оборудование, что и при определении коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} . В процессе испытаний строят кривую в координатах "нагрузка P – прогиб в точке приложения силы f_P " (рис.6.11).

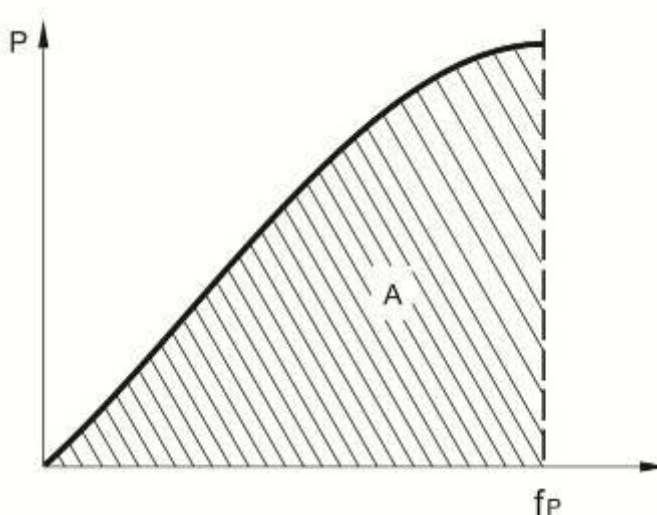


Рис. 6.11 - Диаграмма нагружения образца при определении трещиностойкости по методу J -интеграла: A – работа при нагружении образца; P – нагрузка; f_P – прогиб.

Наибольшие трудности встречаются при определении J -интеграла вязких низкопрочных материалов. При нагружении образцов, изготовленных из таких материалов, перед разрушением предварительно наведенная усталостная трещина "подрастает".

Для определения момента начала роста трещины испытывают несколько образцов, имеющих предварительные трещины одинаковой длины. Первый образец доводят до разрушения или заметного спада нагрузки, остальные нагружают до меньших значений f_R , а затем разрушают на маятниковом копре. Зона пластического разрушения может быть зафиксирована "термическим отенением" (нагрев до температуры 500–600°C, приводящий к окислению зоны разрушения), методом красок, циклическим нагружением или доломом разгруженных образцов при отрицательных температурах. На [рис. 6.12](#) показана схема излома образца при такой последовательности нагружения (зону пластического разрушения фиксировали долом образцов при температуре жидкого азота).

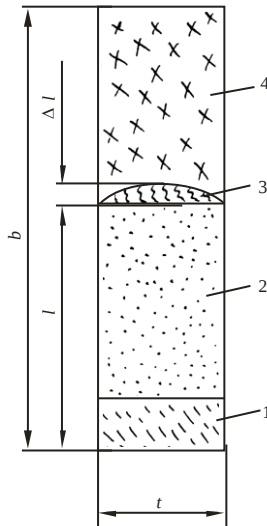


Рис. 6.12 - Схема поверхности излома образца при определении J_{1C} . Зоны: 1 – концентратора; 2 – предварительного усталостного разрушения; 3 – вязкого разрушения; 4 – хрупкого долома; b , t – ширина и толщина образца; l , Δl – длина и подрастание трещины.

В плоскости разрушения образца измеряют подрастание трещины Δl . По диаграмме " $P-f$ " определяют работу A , затраченную при нагружении каждого образца. Для расчета J -интеграла при нагружении изгибом плоских призматических образцов используют формулу:

$$J = \frac{2A}{t(b-l)} \quad (6.7)$$

По результатам испытаний строят кривую в координатах " $J-\Delta l$ ". Величину J_C определяют экстраполяцией зависимости " $J-\Delta l$ " на прямую $J = (\sigma_{0.2} + \sigma_b)\Delta l$ (рис. 6.13).

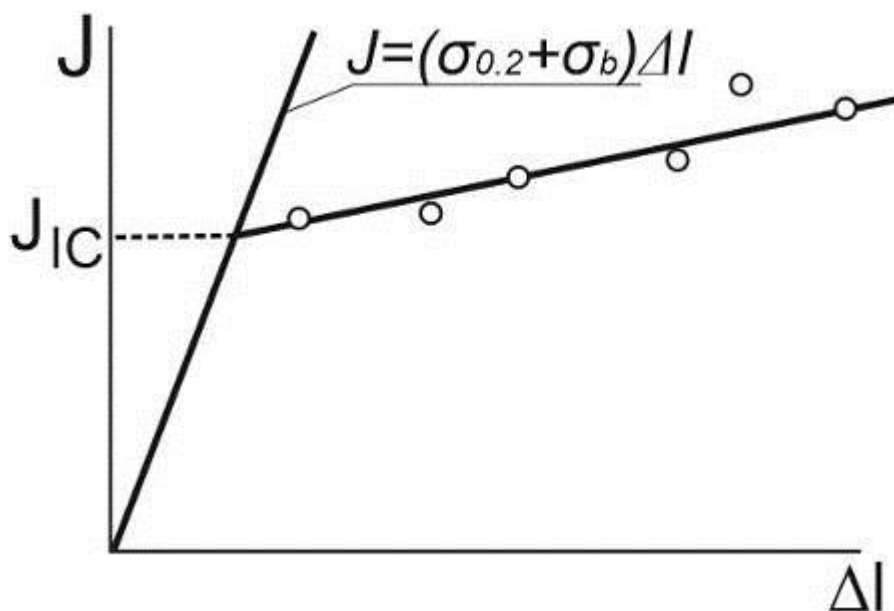


Рис. 6.13 - Определение J -интеграла: $\sigma_{0.2}$ – предел текучести образца; σ_b – предел прочности образца.

Найденное таким образом значение J_C контролируют по формуле (6.5) и если условие выполняется, то $J_C = J_{IC}$. Если нет, то испытания повторяют на образцах большей толщины.

Критическое раскрытие трещины определяют по формуле:

$$\delta_C = \frac{V_C}{1 + \eta \frac{a}{b-l}} \quad (6.8)$$

где, V_C – критическое смещение кромок надреза в месте установки датчика;

η – безразмерный коэффициент.

6. 3. Циклическая трещиностойкость

Трещиностойкость при циклическом нагружении определяется кинетической диаграммой усталостного разрушения (КДУР), которая показывает зависимость скорости роста трещины V от наибольшего коэффициента интенсивности напряжений цикла $K_{\max}$, или его размаха ($\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$) (Рис. 6.14).

Как правило, на КДУР можно выделить три типичных участка. Первый – криволинейный. Его характеризуют малые значения коэффициента интенсивности напряжений и скорости распространения трещины.

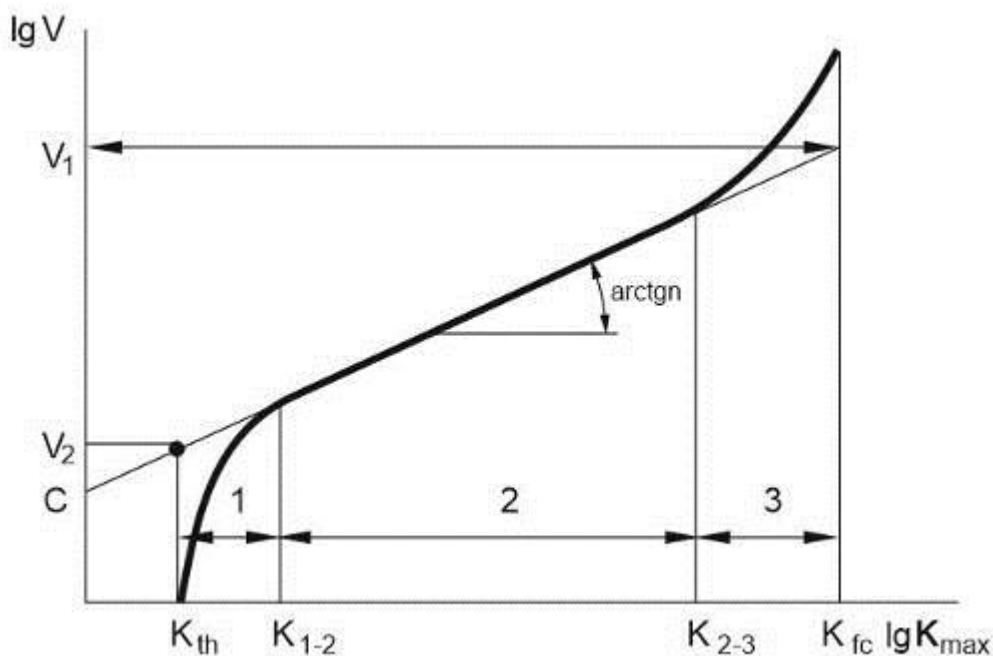


Рис. 6.14 - Кинетическая диаграмма усталостного разрушения материалов (КДУР): 1, 2, 3 – характерные участки КДУР; n – коэффициент

асимметрии цикла; K_{1-2} , K_{2-3} – коэффициент интенсивности напряжений в точках, соответствующих смене участков КДУР с первого на второй и со второго на третий соответственно. K_{th} – пороговый коэффициент интенсивности напряжений; C, n – критический коэффициент интенсивности напряжений; C, n – параметры степенной зависимости Пэриса: $V = C \cdot K_{max}^n$

Второй участок КДУР в координатах " $\lg V - \lg K_{max}$ " – прямолинейный. Этот отрезок диаграммы описывается уравнением Пэриса: $V = C K_{max}^n$. Величина n характеризует угол наклона прямолинейного участка КДУР к оси абсцисс, " C " – длина отрезка, отсекаемого на оси ординат линией, продолжающей прямолинейный участок диаграммы. Третий участок КДУР характеризуется большими значениями коэффициента интенсивности напряжений и большими скоростями распространения трещины. Конечная точка этого участка соответствует моменту разрушения образца.

Основными характеристиками, которые могут быть определены с помощью КДУР, являются:

- 1) C, n – параметры уравнения Пэриса – степенной зависимости скорости роста трещины, аппроксимирующей среднеамплитудный участок КДУР;
- 2) пороговый коэффициент интенсивности напряжений K_{th} – максимальное значение K_{max} , при котором трещина не развивается на протяжении заданного количества циклов;
- 3) критический коэффициент интенсивности напряжений (циклическая трещиностойкость) K_{fc} – значение K_{max} , при котором наступает доллом образца.

Для сопоставления материалов и анализа различных условий испытаний можно использовать наибольшее значение или размах коэффициента интенсивности напряжений K , (ΔK) , соответствующие

определенным скоростям роста трещины v_K ($v_{\Delta K}$) при заданных значениях K_{max} (ΔK).

Как и при оценке статической трещиностойкости для испытаний рекомендуется использовать плоские и цилиндрические образцы. Плоские образцы более удобны с точки зрения контроля длины усталостной трещины.

Установка (Рис. 6.15) позволяет испытывать плоские образцы с постоянной амплитудой усилия в цикле.

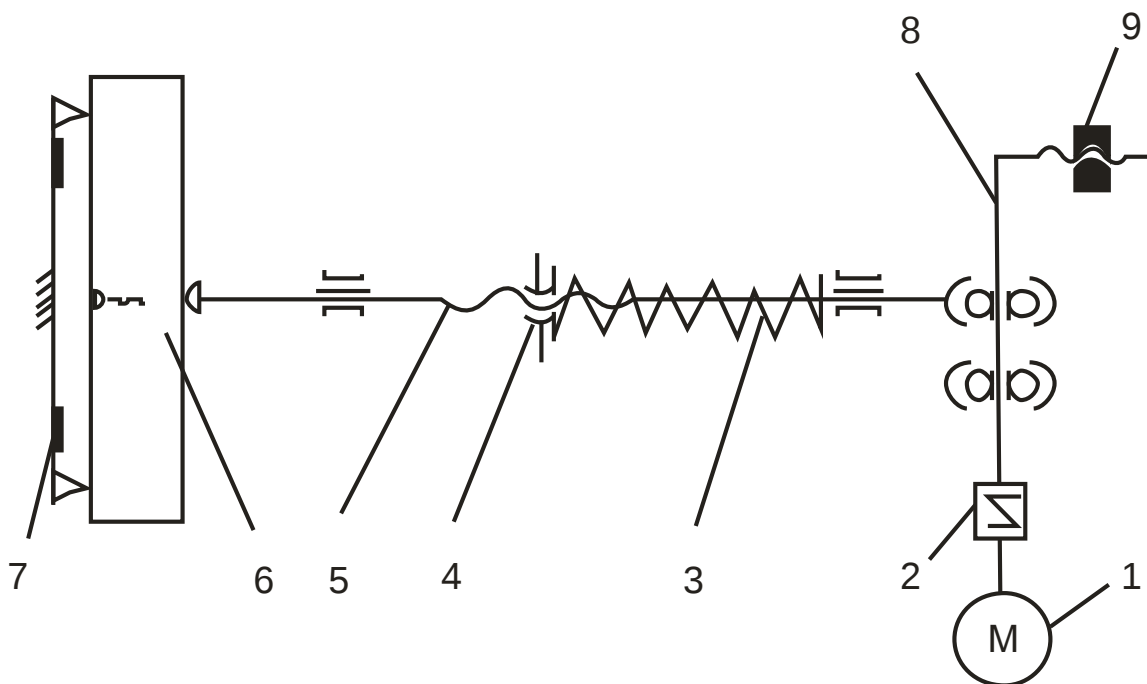


Рис. 6.15- Установка для испытаний на циклическую трещиностойкость: 1 – электродвигатель; 2 – муфта; 3 – пружина; 4 – регулирующая гайка; 5 – шток; 6 – образец; 7 – упругий элемент с тензодатчиками; 8 – вал; 9 – неуравновешенная масса.

Вращение от электродвигателя 1 через компенсирующую муфту 2 передается на вал 3. Неуравновешенная масса 4 при вращении вала создает усилие P , которое через обойму подшипника передается на шток 5 и далее на образец 6.

Электрический сигнал, пропорциональный силе, приложенной к образцу, с тензодатчиков поступает на тензоусилитель 7 и далее на

осциллограф. Пружина 8 предназначена для регулирования гайкой 9 коэффициента асимметрии цикла. Двигатель постоянного тока позволяет вести испытания в широком диапазоне частот (6–20 Гц). Контролируется количество циклов нагружения и длина усталостной трещины. Наиболее трудоемким является определение порогового коэффициента интенсивности напряжений. В этом случае наибольшую нагрузку цикла $P_{\max}$ понижают и находят ее значение, при котором прирост трещины $\Delta l_{\min}$ не увеличивается на протяжении 10^4 циклов ($\Delta l_{\min}$ – минимальный, поддающийся измерению прирост трещины). Для определения циклической трещиностойкости K_{fc} образцы испытывают с увеличивающимся наибольшим коэффициентом интенсивности напряжений цикла $K_{\max}$, фиксируя нагрузку и длину трещины, соответствующие началу долома образца. Скорость роста трещины и коэффициента интенсивности напряжений рассчитывают на ЭВМ.

Размах коэффициента интенсивности напряжений рассчитывают по формуле:

$$\Delta K = \frac{6 \cdot \Delta M \cdot y}{t \cdot \sqrt{b^3}} \sqrt{\lambda}, \quad (6.9)$$

где ΔM – размах приложенного момента;

t – толщина образца;

b – ширина образца;

$$y = 1,93 - 3,07\lambda + 14,53\lambda^2 - 25,11\lambda^3 + 25,80\lambda^4;$$

$$\lambda = \frac{b}{l};$$

l – длина повреждённого сечения.

6. 4. Ударно-циклическая трещиностойкость

Многие детали машин и элементы конструкций подвергаются действию повторяющихся ударных нагрузок, например детали пневмопробойников, перфораторов, отбойных молотков и т.д. Ударно-

циклическое нагружение отличается от циклического высокой скоростью приложения нагрузки и распространением в объеме детали ударных импульсов. Это приводит к снижению показателей циклической прочности материала и росту скорости распространения усталостных трещин. Как правило, определение характеристик трещиностойкости материалов при ударно-циклическом нагружении проводят на механических копрах реализующих схему повторяющегося трехточечного изгиба плоских образцов с надрезом (рис. 6.16). Рабочая часть копра может разгоняться под собственным весом или ей может придаваться дополнительное ускорение за счет предварительного сжатия упругих элементов. Подъем молота обычно осуществляется кулачковыми механизмами. Измерение силы удара производят при помощи тензометрической системы с датчиками, приклеенными к образцу или акселерометрическим методом с креплением датчика ускорения на бойке. Более совершенными являются установки электромагнитного типа, принцип работы которых описан в разделе 5.4. Они обладают высокой надежностью, компактностью, широким диапазоном изменения параметров нагружения, быстротой переналадки и легкостью управления. Кроме того, минимальное количество подвижных частей обеспечивают длительный ресурс эксплуатации при сохранении стабильных рабочих параметров.

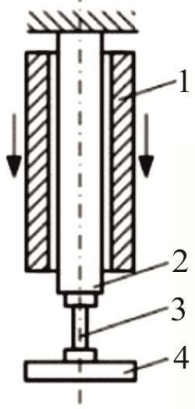
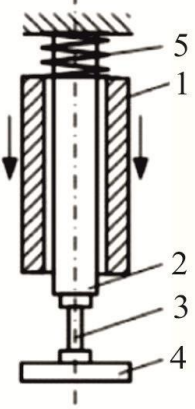
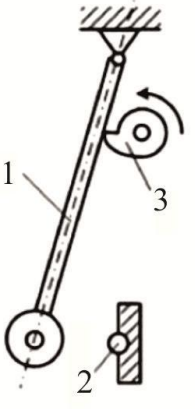
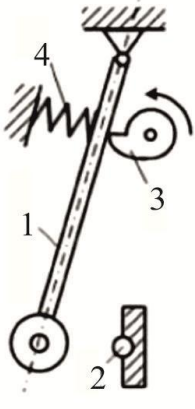
Машины с падающим молотом		Маятниковые копры	
со свободным падением	с дополнительным ускорением	со свободным падением	с дополнительным ускорением
			
1-ударник, 2-стальной стержень, 3 - образец, 4-наковальня, 5-пружина		1-ударник, 2-образец, 3 - кулачок, 4- пружина	

Рис. 6.16 Схемы установок для ударно усталостных испытаний

При испытании по схеме ударно-циклического сжатия сравнение различных материалов и оценка эффективности технологий их обработки производится по критерию долговечности. Сопротивление росту усталостной трещины в материале оценивается фиксацией времени до момента зарождения трещины и временем ее распространения до полного слома образца. Проведение сравнительной оценки трещиностойкости различных материалов в условиях многократного динамического изгиба осуществляется путем анализа построенных на основании полученных экспериментальных данных кинетических диаграмм усталостного разрушения (КДУР) построенных в координатах: «скорость роста трещины - коэффициент интенсивности напряжений». При расчете величины коэффициента интенсивности напряжений ΔK и скорости роста усталостной трещины V используют рабочие формулы, предложенные испытаний материалов по схеме трехточечного изгиба в условиях циклического нагружения.

Список литературы

1. Батаев А.А., Батаев В. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: Учебное пособие; - : НГТУ, 2002. - 383 с.
2. Броек Д. Основы механики разрушения. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.
3. Екобори Т. Научные основы прочности и разрушения металлов. – Киев: Наукова думка, 1978. – 352 с.
4. Макклиток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов. – М.: Мир, 1970. – 443 с.
5. Москвичев В. В., Махутов Н. Черняев А. П. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем. Новосибирск: Наука, 2002. - 334 с.
6. Нотт Д. Ф. Основы механики разрушения. – М. Металлургия, 1978. – 256 с.
7. Плохов А. В., Попелюх А. И., Веселов С. В., Тюрин А. Г., Никулина А. А. Исследование конструктивной прочности материалов после комбинированного упрочнения и специальных видов сварки. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. -392 с.
8. Работнов Ю. Н. Введение в механику разрушения. – М.: Наука, 1987. – 80 с.
9. Романив О. Н. Вязкость разрушения конструкционных сталей. Сер. Достижения отечественного металловедения. – М.: Металлургия, 1979. – 176 с.
10. Тушинский Л. И., Синдеев В. И., Плохов А. В. Структура и механические свойства модифицированных поверхностей машиностроительных материалов. Учебное пособие.- Новосибирск: НГТУ, 1996.- 193с.

11. Ion Dumitru · Liviu Marsavina · Nicolae Faur Estimating durability of steels at repeated bending impacts Int J Fract (2009) 157:89–100 DOI 10.1007/s10704-008-9295-2

7. Жаропрочность

7.1. Жаропрочные материалы

Жаропрочность – совокупность свойств конструкционных материалов, которые обеспечивают высокую работоспособность изделиям при высоких температурах без заметной пластической деформации и разрушения. Жаропрочность необходимо знать для ответственных деталей атомных реакторов, материалов газовых и паровых турбин, ракетных и авиационных двигателей, нагруженных клапанов двигателей внутреннего сгорания и др.

Жаропрочные стали могут надежно и длительное время работать при температурах до 750 °С, кобальтовые сплавы—до 1100 °С, специальные композиционные материалы – свыше 1200 °С. Большей жаропрочностью обладают оксиды, изделия из которых могут работать до 1900 °С.

Требуемые сроки службы жаропрочных сплавов изменяются от 1-2ч (ракеты) до сотен (авиационные газовые турбины) и многих тысяч часов (стационарные газовые и паровые турбины).

Химический состав, структуру и свойства жаропрочных сталей и сплавов, способных работать в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение определенного времени регламентирует ГОСТ 5632. В зависимости от структуры стали подразделяют на классы:

- мартенситный - с основной структурой мартенсита;
- мартенситно-ферритный, содержащие в структуре, кроме мартенсита, не менее 10% феррита;
- ферритный, имеющие структуру феррита;
- аустенито-мартенситный, со структурой аустенита и мартенсита, количество которых можно изменять в широких пределах;

- аустенито-ферритный, содержащие структуру аустенита и феррита (феррит более 10%);
- аустенитный, со структурой аустенита.

Подразделение сталей на классы по структурным признакам является условным и произведено в зависимости от основной структуры, полученной при охлаждении сталей на воздухе после высокотемпературного нагрева.

Жаропрочные стали благодаря сравнительно невысокой стоимости широко применяют в высокотемпературной технике. Рабочие температуры жаропрочных сталей 500- 750°C. При температурах до 600 °C чаще используют стали на основе α -твердого раствора, а при более высоких температурах - стали на основе аустенитной структуры, обладающие более высокой жаропрочностью. Аустенитные жаропрочные стали бывают с интерметаллидным и карбидным упрочнением. Хром и никель являются в них основными легирующими элементами. Повышение жаропрочности в аустенитных сталях достигается легированием молибденом, ниобием, вольфрамом, титаном и другими элементами. Типовая термическая обработка таких сталей состоит в закалке на аустенит и последующем старении. При этом в пластичном аустените в результате старения выделяются дисперсные частицы прочных и твердых карбидов или интерметаллидов, равномерно распределенных в аустенитной матрице. Повышение жаропрочности достигается в этом случае за счет эффекта дисперсионного упрочнения. Стали с интерметаллидным упрочнением более жаропрочны, чем стали с карбидным упрочнением. Чем сложнее по составу стали, тем выше легированность твердого раствора и больше упрочняющих фаз, тем выше их жаропрочность.

Дислокационную природу жаропрочности сталей и сплавов показал Ю.М. Лахтин. При температурах ниже (0,45—0,5) $T_{пл}$. прочность сплавов определяется стабильностью их дислокационной структуры. При более высоких температурах стабильность дислокационной структуры нарушается

(уменьшается плотность дислокаций, растет число вакансий и т.д.) и развиваются диффузионные процессы разупрочнения (возврат и рекристаллизация, сфероидизация и коагуляция частиц избыточных фаз и т.д.).

Деформация и разрушение при высоких температурах часто происходят по границам зерен. Это объясняется тем, что по границам зерен, содержащих большое количество дефектов (вакансий, дислокаций и т.д.) легко протекают диффузионные процессы. Когда напряжения отсутствуют, диффузионные перемещения пограничных атомов не имеют направленного характера. При наличии даже небольших напряжений эти перемещения атомов, особенно на границах зерен, приобретают направленный характер, что способствует ползучести металла. В процессе ползучести происходят перемещения одного зерна относительно другого вдоль поверхности их раздела, так называемое проскальзывание. Такой механизм пластической деформации называют диффузионной пластичностью в отличие от сдвиговой по объему зерна.

Таким образом, если при низких температурах границы зерен тормозят движение дислокаций и упрочняют сплав, то при высоких температурах, наоборот, способствуют ускоренному разупрочнению поликристаллических металлов. Более крупное зерно способствует повышению жаропрочности, хотя при этом пластичность часто снижается.

Основными критериями оценки жаропрочности являются предел ползучести, предел длительной прочности, релаксация напряжений.

7.2. Испытания на ползучесть

7.2.1. Понятия и определения

Ползучесть – свойство металла медленно пластически деформироваться под действием постоянной нагрузки при постоянной температуре. При комнатной температуре и напряжениях ниже предела упругости ползучесть не наблюдается. Она имеет место при температурах

выше 0,6 Тпл, когда протекают процессы разупрочнения, и при напряжениях выше предела упругости.

В зависимости от температуры и уровня приложенного напряжения ползучесть протекает по разным законам. Наиболее известны три вида ползучести:

- обратимая ползучесть, протекает при напряжениях ниже критического уровня и считается неопасной для конструкций;
- высокотемпературная ползучесть, которая протекает при температурах выше (0,6...0,8Тпл);
- диффузионная ползучесть реализуется при очень высоких температурах (0,8...0,9Тпл).

7.2.2. Образцы, оборудование, испытания

Метод испытания на ползучесть черных и цветных металлов и сплавов при температуре до 1200 °С устанавливает ГОСТ 3248 (ИСО/Р-203, ИСО/Р-204). Сущность метода состоит в том, что образец подвергают воздействию постоянной растягивающей нагрузки и постоянной температуры при фиксировании деформации образца во времени.

В результате испытания определяют предел ползучести материала -- напряжение, которое вызывает за установленное время испытания при данной температуре заданное удлинение образца или заданную скорость деформации (ползучести).

ГОСТ 3248 устанавливает основные образцы (рис. 7.1 Геллер): цилиндрические - диаметром 10 мм, с расчетной длиной 100, 150 и 200 мм; плоский - шириной 15 мм, с расчетной длиной 100 мм.

Рис. 7.1. Основные образцы для испытаний по ГОСТ 3248

Технические требования к машинам для испытания металлов на ползучесть должны соответствовать ГОСТ 28845. По виду испытательной среды машины подразделяют для испытаний образца в: воздушной среде, вакууме, среде инертного газа. Машины должны обеспечивать: соосность приложения нагрузки к образцу; автоматическое поддержание заданной нагрузки; автоматическое поддержание температуры; автоматическую регистрацию температуры или автоматическую регистрацию отклонений от установившейся температуры на протяжении всего испытания; измерение деформации; испытание при одном из видов нагружения -- при растяжении, сжатии, изгибе.

Машины для испытания материалов на ползучесть, длительную прочность и релаксацию значительно отличаются от испытательного оборудования, используемого при статических испытаниях на растяжение. Они более сложны и требуют особо тщательной поверки и регулировки, так как предназначены для длительной, непрерывной работы.

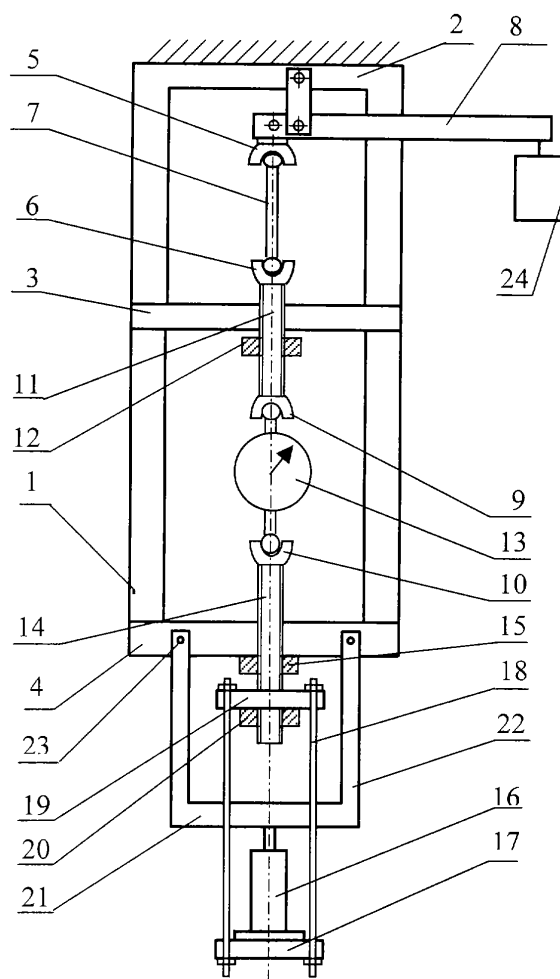


Рис.-7.2 Машина для испытания материалов на ползучесть, длительную прочность и релаксацию (пояснения в тексте).

Образец (рис.7.2) 7 устанавливают в захватах 5 и 6, затем рычажным механизмом 8 груз с подвеской 24 перемещают на заданную длину рычага, связанного с верхней траверсой 2. В дополнительные захваты 9, 10 вставляют динамометр 13 и гайкой 15 выбирают зазор. Затем к установке присоединяют механизм поддержания постоянной нагрузки. Для этого на ходовой винт 14 крепят рамку 18, верхний ригель 19 которой соединен с ходовым винтом гайкой 20. Затем П-образную опору 22 пропускают через рамку 18, стойки которой 22 крепят к нижней траверсе 4 установки 1 с помощью фиксаторов 23, вставляют силовозбудитель 16 одним концом на ригель 17 рамки 18, а другим концом доводят до соприкосновения с

поперечиной 21 П-образной опоры 22 подкручиванием гайки 20 на ходовом винте 14.

Механизм поддержания постоянной нагрузки регулируют следующим образом. Через силовозбудитель 16 производят натяжение образца 7 до поднятия рычага 8 до горизонтального положения и перемещением подвески с грузом 24 по плечу рычага 8 добиваются требуемого усилия, контролируя его по динамометру 13. Полученную требуемую нагрузку фиксируют подкручиванием гайки 12 на винте 11 к средней траверсе 3. Установка может годы держать нагрузку без ее изменения.

Образец, установленный в захватах испытательной машины и помещенный в печь (на рисунке не приведена), нагревают до заданной температуры и выдерживают при этой температуре не менее 1 ч. Необходимо периодически, не реже чем через 2 ч, измерять температуру испытания. Рекомендуется автоматическая запись температуры на протяжении всего испытания. Температуру испытания выбирают кратной 25, если по условиям исследования не требуется специальная температура.

После нагрева образца и выдержки при заданной температуре к образцу плавно прикладывают предварительную нагрузку, равную приблизительно 10% от заданной общей нагрузки, но при этом предварительная нагрузка не должна вызывать в образце напряжение более 10 МПа. Если температура образца и показания измерителя удлинения остаются в течение 5 мин неизменными, то проводят плавное нагружение образца до заданной нагрузки.

Одновременно с приложением нагрузки регистрируют удлинение образца, начиная с предварительной нагрузки. Регистрировать удлинение образца следует непрерывно, или с такими интервалами, чтобы можно было полностью установить характер изменения удлинения.

Продолжительность испытания и допуск на деформацию при заданных напряжениях и температуре устанавливают для каждого материала

в зависимости от его назначения. Определение предела ползучести рекомендуется проводить при допусках на удлинение от 0,1 до 1 % при длительности испытания 50, 100, 300, 500, 1000, 3000, 5000, 10000 ч.

При определении предела ползучести по скорости ползучести продолжительность испытания должна составлять не менее 2000-3000 ч. После окончания испытания образец разгружают до величины предварительной нагрузки и определяют абсолютную величину остаточного удлинения.

Процесс испытания представляют в виде первичной кривой ползучести в координатах удлинение — время (рис. 7.3). На кривых ползучести (рис. 7.3, а) можно отметить участок ОА, соответствующий упругой и пластической деформации, вызванной мгновенным приложением нагрузки; затем следует участок АВ, на котором металл деформируется с неравномерной и замедляющейся скоростью (стадия неуставившейся ползучести), и участок ВС, характеризующий равномерную скорость ползучести (стадия установившейся ползучести).

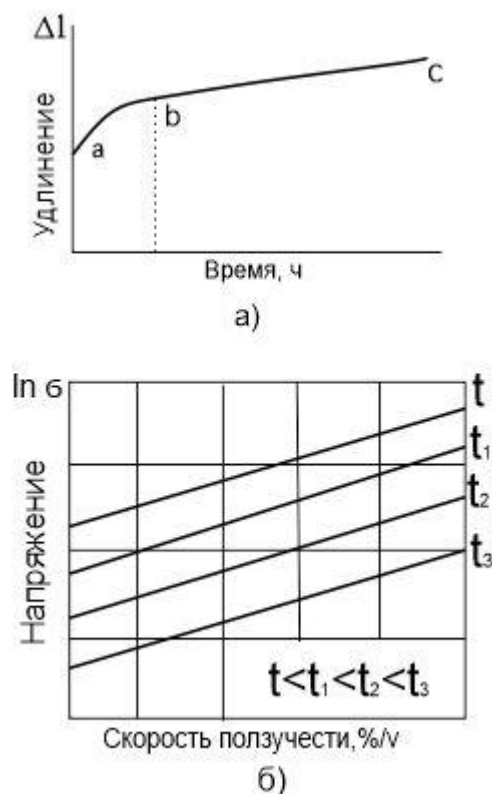


Рис. 7.3 – Характеристики жаропрочности металла (по Ю. М. Лахтину): а- первичная кривая ползучести; б- схема диаграммы напряжение—скорость ползучести

На основании полученных кривых ползучести строят зависимость между напряжением и удлинением или между напряжением и средней равномерной скоростью ползучести на прямолинейном участке в логарифмической системе координат. Зависимость между средней равномерной скоростью ползучести и приложенным напряжением в логарифмической системе координат имеет вид прямой, угол наклона которой к оси абсцисс определяется температурой испытания (рис. 7.3, б). По заданной скорости деформации в период равномерной ползучести можно по диаграмме определить условный предел ползучести.

Предел ползучести обозначают (ГОСТ 3248) σ с числовыми индексами, например $\sigma_{7000,2/100}$ — предел ползучести при допуске на деформацию 0,2 % за 100 ч испытания при температуре 700 °С. При этом необходимо указать,

как определялся предел ползучести — по суммарной или остаточной деформации. В случае определения по скорости ползучести предел ползучести обозначают σ с двумя числовыми индексами. Нижний индекс означает заданную скорость ползучести (%/ч), верхний — температуру испытания, °С; например, $\sigma_{600}10-5$ — предел ползучести при скорости ползучести 10-5 %/ч при температуре 600 °С.

7.3. Испытания на длительную прочность

Испытание на длительную прочность отличается от испытания на ползучесть тем, что испытуемый образец доводят при данной температуре и напряжении до разрушения. В результате испытания определяют предел длительной прочности, т. е. наибольшее напряжение, вызывающее разрушение металла за определенное время при постоянной температуре.

Метод испытания на длительную прочность черных и цветных металлов и сплавов при температуре до 1200 °С устанавливает ГОСТ 10145 (ИСО/Р-206). В результате испытаний определяют предел длительной прочности или устанавливают контрольную характеристику--время до разрушения при заданном напряжении.

Типоразмеры образцов подобны образцам для испытаний на ползучесть. При применении образцов различных размеров необходимо учитывать возможное влияние масштабного фактора на результаты испытания. Образцы по форме и размерам головок образца и переходной части от головки к его рабочей длине определяют принятым способом крепления образца в захватах испытательной машины и способом крепления измерителя удлинения, если испытание сопровождается измерением деформации образца. Сопряжение головки образца с его рабочей частью должно быть плавным.

Технические требования к машинам для испытания металлов на длительную прочность (рис. 7.2) должны соответствовать ГОСТ 28845.

Образец, установленный в захватах испытательной машины и помещенный в печь, нагревают до заданной температуры и выдерживают при этой температуре не менее 1 ч. После нагрева образца и выдержки при заданной температуре к образцу плавно прикладывают нагрузку.

В результате испытаний устанавливают зависимость между напряжением и временем до разрушения при заданной постоянной температуре. При этом число уровней напряжений должно быть не менее трех.

По результатам испытаний серии образцов для каждого напряжения определяют среднее значение времени до разрушения. Количество образцов в серии должно обеспечивать необходимую точность определения предела длительной прочности.

В логарифмических координатах зависимость **времени до разрушения от напряжения** представляет собой прямую линию (рис. 7.4).

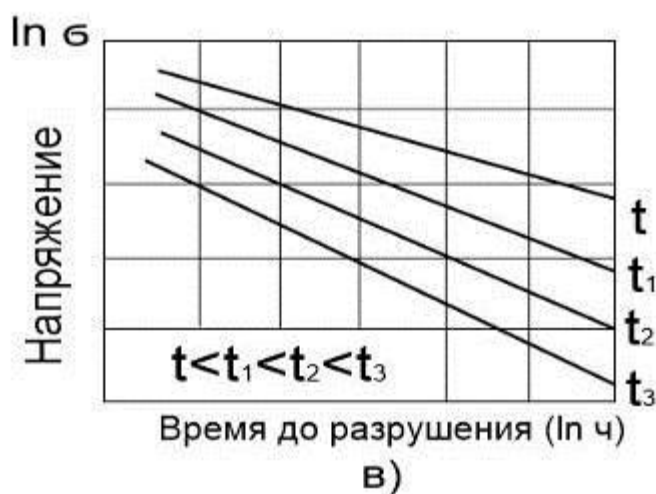


Рис.7.4. Зависимость времени до разрушения от напряжения для разных температур.

Это позволяет для ряда сплавов экспериментально построенные кривые для продолжительности 700—1000 ч экстраполировать на значительно большую длительность (10000—100000 ч). Эта зависимость может иметь точку перелома, что связано со сменой механизма разрушения: переходу от внутрикристаллитного разрушения к межкристаллитному.

Время до разрушения при заданной величине напряжения также является показателем данного вида испытания. После разрушения образца дополнительно определяют относительное удлинение и относительное сужение.

Предел длительной прочности обозначают σ с двумя числовыми индексами, например $\sigma_{7001000}$ — предел длительной прочности за 1000 ч при температуре 700 °С.

7.4. Испытания на релаксацию напряжений

Релаксация напряжений - уменьшение напряжений в упругонапряженном материале при неизменяемых линейных размерах в направлении действующих сил. При релаксации напряжений суммарная деформация (пластическая и упругая) равна исходной, а соотношение между видами деформации изменяется: пластическая растет, упругая падает. Релаксация напряжений от ползучести отличается тем, что при первой напряжения уменьшаются, а суммарная деформация остается постоянной, а при второй—деформация меняется при постоянстве напряжений или нагрузки.

Релаксационная стойкость—способность материала противостоять релаксации напряжений, оценивается напряжением, оставшимся в материале через заданное время (200-3000 ч), или падением напряжения за то же время. Релаксация напряжений зависит от начального напряжения, температуры, времени испытаний.

Методы испытаний на релаксацию напряжений при температуре до 1200°C при растяжении, изгибе и кручении черных и цветных металлов и сплавов

устанавливает ГОСТ 26007. Сущность методов состоит в том, что в испытуемых образцах определяют изменение напряжения во времени в условиях постоянства суммарной деформации образца, равной заданной начальной деформации.

При релаксации напряжений имеет место медленное перемещение дислокаций переползанием и поперечным скольжением. Причем в материале при этом формируется субзеренная структура, а по границам зерен происходит смещение.

Для каждой из схем нагружения (растяжение, изгиб, кручение) ГОСТ 26007 устанавливает особые образцы. Нагревательное устройство должно обеспечивать равномерный нагрев образцов по всей расчетной длине до заданной температуры и сохранение последней во время всего испытания.

Испытания при заданной температуре проводят не менее чем на трех уровнях начального напряжения, при этом на каждом уровне испытывают не менее двух образцов. Упругие перемещения определяют как разность показаний при измерениях перемещений для нагруженного состояния и разгруженного.

Порядок испытания образцов в режиме автоматического поддержания постоянства деформации следующий. Установленный в захватах испытательной машины и помещенный в печь образец нагревают до температуры испытания и выдерживают его при этой температуре до полного прогрева не менее 2 ч. Затем нагружают образец и одновременно включают систему автоматического поддержания постоянства деформации на расчетной части образца. При этом регистрируют изменение нагрузки непрерывно или с таким интервалом, чтобы можно было полностью установить характер релаксации.

Обработка результатов состоит в определении величины упругих напряжений в образце во время испытаний. Кривую релаксации в координатах «напряжение—время» записывают непосредственно во время испытаний (рис.7.5). Она может быть перестроена при обработке результатов в координатах: "ордината - напряжение в равномерном масштабе, абсцисса - время в логарифмическом масштабе".

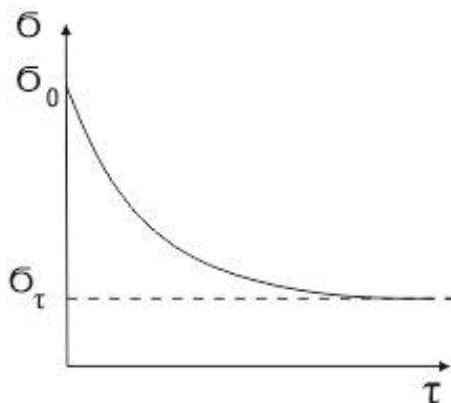


Рис. 7.5 - Кривая релаксации напряжений

Кривая релаксации показывает уменьшение напряжений в образце во времени при постепенном нарастании доли пластической деформации в заданной общей начальной.

Релаксационная стойкость характеризуется напряжением релаксации и падением напряжения в образце по истечении определенного интервала времени. Под первой характеристикой подразумевают постоянное остаточное напряжение, установившееся после 200 – 3000 часов от момента нагружения образца.

Список литературы

1. Драпкин Б.М., Кононенко В.К., Безъязычный В.Ф. Свойства сплавов в экстремальном состоянии. - М.: Машиностроение, 2004. - 256 с.
2. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. - М.: Машиностроение, 1998. - 464 с.
3. Кишкин С.Т. Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов. - М: Наука, 2006. - 410 с.
4. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. - М.: Машиностроение, 1990. - 528 с.
5. Kaufman J.G. Relational Analysis Guidelines for Estimating the High and Low-Temperature Properties of Metals Materials Park. - OH: ASM International, 2011. – 279 p.
6. Levitin V. High Temperature Strain of Metals and Alloys: Physical Fundamentals. - Weinheim: Wiley-VCH, 2006. - 170 p.

8. Защитные свойства

8.1. Жаростойкость

8.1.1. Понятия и определения

Жаростойкость (окалиностойкость) - способность материала противостоять химическому разрушению поверхности, окислению под воздействием горячего воздуха или другого газа, в ненагруженном или слабонагруженном состоянии. Жаростойкие стали, сплавы и покрытия должны надежно работать при температурах выше 550 °С. Различают *сплошное окисление (равномерное и неравномерное)* по всей внешней поверхности и *местное* - на отдельных участках. *Локальные очаги коррозии* называют иногда язвами.

ГОСТ 21910 устанавливает термины и определения характеристик жаростойкости металлов. Для равномерной коррозии (окисления) принимают следующие основные понятия. *Удельная потеря (прирост) массы* -

уменьшение (увеличение) массы за рассматриваемый интервал времени, отнесенное к единице площади поверхности. *Глубина равномерной коррозии* - средняя величина поверхностного слоя, удаленного вследствие коррозии за рассматриваемый интервал времени. *Средние скорости потери (прироста) массы* - отношение разности удельных потерь (приростов) массы, соответствующих концу и началу рассматриваемого интервала времени к его величине. *Средняя скорость проникновения коррозии* - отношение разности глубин равномерной коррозии, соответствующих концу и началу рассматриваемого интервала времени к его величине.

Жаростойкость при местной коррозии характеризуется следующими основными показателями. *Максимальная глубина коррозионных язв на поверхности* - наибольшее значение глубины из всей совокупности измерений. *Средняя глубина язв на поверхности* - среднее арифметическое измеренных глубин. *Степень язвенной коррозии* - отношение средней величины язв к глубине равномерной коррозии. *Плотность коррозионных язв на поверхности* - отношение числа язв на поверхности к ее площади. *Средняя скорость роста максимально глубоких язв* - отношение разности максимальных размеров язв, соответствующих началу и концу рассматриваемого интервала времени, к его величине.

Во многих случаях попытки улучшения жаростойкости материалов металлургическим путем не давали положительных результатов. Успехи, достигнутые в последние годы в области защиты основного металла, позволяют считать, что применение жаростойких покрытий для особо важных конструкций, работающих при температурах выше 550 °С, - наиболее реальный и перспективный путь повышения конструктивной прочности. Защитные покрытия формируются из различных жаростойких материалов: металлов и сплавов, керамико-металлических соединений, тугоплавких оксидов, боридов, карбидов.

Для повышения окалиностойкости в сталь добавляют легирующие элементы, обладающие большим сродством к кислороду, чем железо. Такими элементами являются хром, алюминий, кремний, которые образуют на поверхности при нагреве тонкую плотную пленку оксидов, надежно защищающую металл от дальнейшего окисления. Жаростойкость определяется химическим составом и слабо зависит от структуры металла. Увеличение содержания хрома, алюминия или кремния, образующих плотные оксиды Cr_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , обуславливает повышение жаростойкости. Лучшие результаты обычно получают при комбинированном легировании алюминием, хромом и кремнием (сильхромы). В качестве других легирующих элементов используют молибден, титан, никель и др.

Наряду с оптимизацией состава основного металла и жаростойких покрытий изменяют состав окислительных сред. Для этого применяют герметизацию, добавляют в рабочее пространство поглотители кислорода, размещают рядом с окисляющимся изделием летучие борсодержащие неорганические вещества, которые вызывают образование плотной защитной оксидной пленки, вводят специальные ингибирующие и пассивирующие добавки.

Скорость окисления обычно изменяется по линейному, параболическому или логарифмическому законам. В отдельных случаях для сложных систем возможны иные зависимости.

Состояние поверхности образца (шероховатость) влияет на характеристики жаростойкости прежде всего потому, что при грубой обработке возникает значительная разница между геометрически измеренной и фактически реакционной поверхностью образца.

Жаростойкие покрытия наносят различными методами, но лучшими защитными свойствами обладают диффузионные и электролитические покрытия. В свою очередь лучшими композициями диффузионное покрытие - основной металл являются силицидные покрытия на тугоплавких металлах

- молибдене и вольфраме, а так же алюминиевые покрытия на жаростойких сплавах на никелевой и кобальтовой основах. В первом случае на поверхность наносят кремний, который диффундирует внутрь с образованием силицидов молибдена и вольфрама (MoSi_2 и WSi_2). Эти соединения окисляются с образованием богатых кремнием оксидов, которые обеспечивают высокую стойкость к окислению. Во втором случае алюминий диффундирует в верхние слои жаропрочных сплавов с образованием NiAl и CoAl . Эти соединения затем образуют при окислении защитные плёнки из Al_2O_3 .

Взаимодействие материала, защищённого покрытиями с потоком высокотемпературного химически активного газа в зависимости от соотношения газообразных и твердых продуктов, образующихся в результате химических реакций, может приводить к развитию дефектов в покрытии или к их залечиванию. Типичные случаи взаимодействия приведены на рис. 8.1.

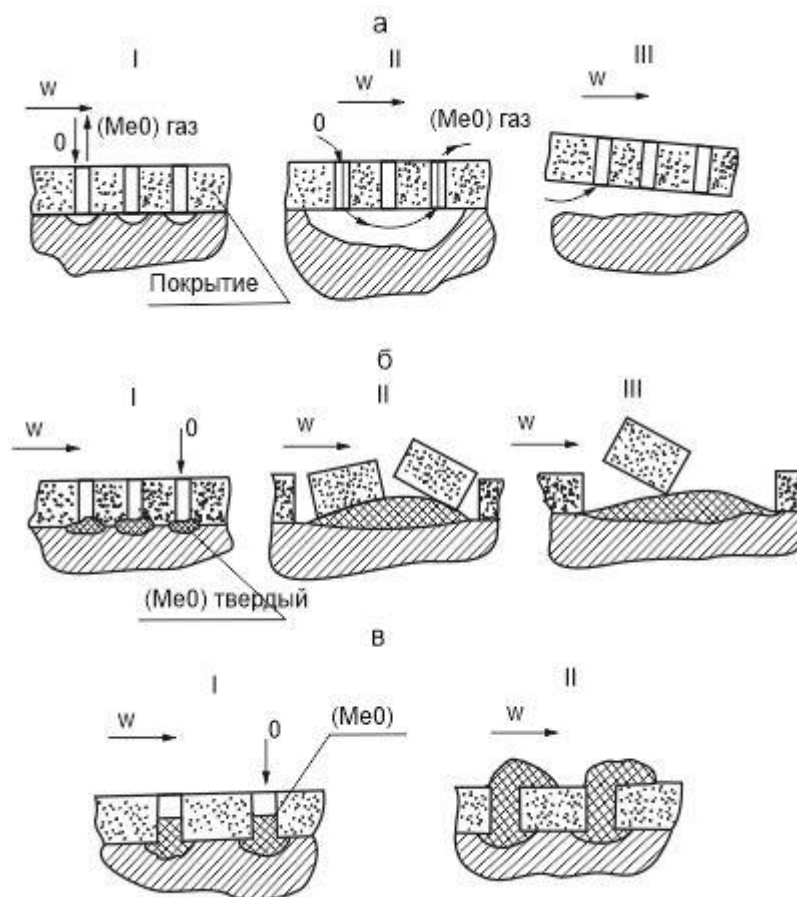


Рис. 8.1 – Типичные варианты механизмов окисления материалов с покрытиями (по В.С.Терентьеву). Продукты окисления: а – газообразные; б – твёрдые; в – различном агрегатном состоянии; I – III – различные стадии окисления.

Если в результате окисления образуются лишь газообразные продукты (рис: 8.1, а), то у основания сквозных пор и трещин под покрытием образуются пустоты в защищаемом материале, которые с течением времени соединяются между собой и образуют сквозные каналы или полностью отслоившиеся от поверхности участки покрытия. Начиная с этого момента времени приток окислителя к материалу под покрытием уже определяется не столько диффузией, сколько конвективными потоками окислителя под покрытием, развивающимися под действием градиента давления вдоль

поверхности. Этот механизм является внештатным и должен считаться «отказом» в работе конструкции. Продолжение работы в этих условиях, как правило, приводит к механическому растрескиванию и разрушению участка покрытия.

При чрезмерно большом увеличении объема при образовании твердого и прочного оксида (рис. 8.1, б) в результате взаимодействия с потоком газа происходит механическое разрушение (взламывание) покрытия с последующим уносом его потоком. Если же соотношение объемов газообразных и твердых продуктов окисления таково, что твердых продуктов несколько больше или просто достаточно для заполнения пустот, то происходит самозалечивание пор и дефектов материала (рис. 8.1, в). Выталкивание оксида из пор приводит к образованию наростов на поверхности покрытия. При этом желательно, чтобы имело место незначительное превышение температуры плавления оксида по отношению к температуре поверхности. Это приводило бы к его расплавлению, растеканию по поверхности и залечиванию микродефектов, при условии, что покрытие хорошо смачивается расплавом данного оксида.

Оптимальный выбор исходных материалов и технологии нанесения жаростойких покрытий должен обеспечивать максимальную окалиностойкость, достаточно высокую прочность соединения, минимальную открытую пористость и газопроницаемость, близость температурных коэффициентов линейного расширения покрытия и основного металла.

8.1.2. Образцы, оборудование, испытания

При выборе геометрии и размеров образца рекомендуется руководствоваться следующим принципом: для получения более точных результатов берут крупные образцы с плоской поверхностью максимальной площади. Образцы обычно представляют собой прямоугольные пластины толщиной $3 \pm 0,2$ мм, длиной 30-60 мм, шириной 20-30 мм. Для повышения

точности испытаний образцы со всех сторон рекомендуется шлифовать до одинаковой шероховатости.

Стандартные испытания на жаростойкость заключаются в выдержке образца при постоянной температуре в воздушной или заданной газовой среде в течение времени, необходимого для выявления закономерностей газовой коррозии. По ГОСТ 6130 жаростойкость определяют тремя методами, из них два гравиметрических (весовых) - по увеличению массы образца и по ее уменьшению и третий - непосредственным измерением глубины коррозии.

Сущность гравиметрических методов состоит во взвешивании образца после нагрева и определении увеличения массы в процессе окисления или уменьшения массы образца при удалении продуктов коррозии с его поверхности. Выбор метода измерения жаростойкости зависит от конкретных условий испытаний и материалов. Первый метод (увеличение массы) целесообразно использовать для любых материалов при массовых и серийных испытаниях, при выявлении кинетики окисления. Этот же метод следует применять при образовании трудноудаляемых оксидов. Вторым методом испытывают преимущественно те металлы, у которых удаление продуктов окисления не вызывает особых затруднений.

Метод непосредственного измерения глубины коррозии рекомендуется для высоких температур в условиях неравномерного окисления. Для более достоверной оценки жаростойкости желательно применять параллельно один из весовых методов и метод непосредственного измерения глубины коррозии.

Установки для испытаний на жаростойкость должны обеспечивать автоматическую регулировку температуры и ее постоянство в отдельных точках рабочего объема. Необходимо использовать внешний нагрев образца, так как при электронагреве будет наблюдаться значительный градиент

температур не только по длине, но и по сечению. Не рекомендуется также нагрев электронный, плазменный и индукционный.

При оценке жаростойкости в конкретных условиях температуру нагрева и газовую среду выбирают близкими к эксплуатационным. Особо тщательно следует воспроизводить все условия работы, если цель исследований--прогнозирование долговечности особо важных конструкций.

Условия окружающей среды (температура и состав атмосферы) должны оставаться постоянными в течение испытаний. Заданную температуру вокруг образца поддерживают при помощи принудительной циркуляции газовой среды, однако перемещение ее должно быть таким, чтобы при испытаниях преобладали окислительные процессы, а эрозионные были приостановлены

Жаростойкость при стандартных испытаниях оценивают обычно в лабораторных печах. Вместе с тем созданы несколько специальных моделей гелиоустановок, которые позволяют изучать зависимость работоспособности материалов при высоких температурах от различных факторов, в том числе химического состава и давления рабочей среды. К основным достоинствам солнечных печей относятся: высокие (до 3500 °С) легко регулируемые температуры, получаемые в химически чистых средах (без примесей продуктов сгорания нагревателей); возможность осмотра образца в процессе эксперимента, простота эксплуатации; безвредность и безопасность работы для обслуживающего персонала. Кроме того, в солнечных печах тепло подводится только с одной стороны, что во многих случаях соответствует реальным условиям работы изделий.

При непрерывном взвешивании образцов (по увеличению массы) на коромысловых весах вместо одной из чашек на проволоке из жаростойкой стали подвешивают образец или тигель с образцами, находящимися в шахтной печи (рис. 8.2). Тигель, проволоку и образцы уравнивают на нулевое положение шкалы. С коромыслом жестко связан сердечник

дифференциального трансформатора. При изменении массы тигля с образцами, находящимися в печи, коромысло отклоняется от горизонтального положения и связанный с ним сердечник перемещается внутри катушек K_{T1} и K_{T2} , которые в свою очередь соединены с сопротивлениями R_1 и R_2 по мостовой схеме. В результате перемещения сердечника в схеме моста возникает разность потенциалов, которая через усилитель передается на записывающее устройство. Недостатком регистрирующего устройства является возникновение магнитных сил, которые отрицательно влияют на точность взвешивания.

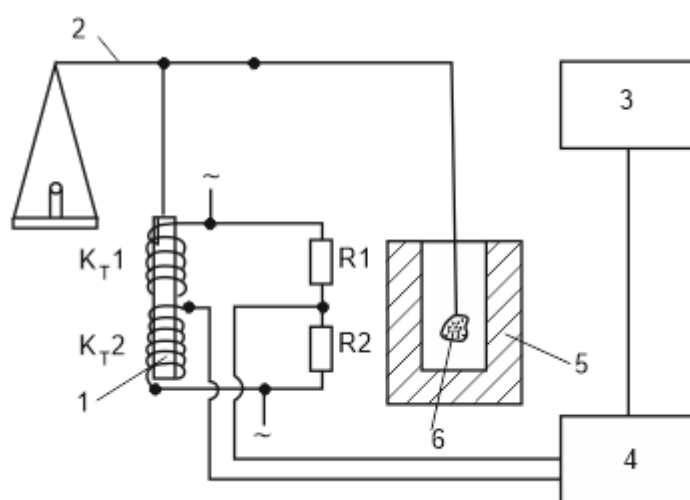


Рис.8.2 – Схема испытаний на жаростойкость при непрерывном взвешивании образцов: 1 - сердечник дифференциального трансформатора; 2 - коромысло аналитических весов; 3 - записывающее устройство; 4 -усилитель; 5 - лабораторная печь; 6 - тигель с образцами.

Этого недостатка лишено фотоэлектрическое регистрирующее устройство. На коромысле весов крепится зеркало, на которое падает световой луч. Отразившись через оптическую систему, луч освещает два фотосопротивления. При горизонтальном положении коромысла оба фотосопротивления освещены одинаково и сигнал отсутствует. При наклоне

коромысла под влиянием изменения нагрузки фотосопротивления поразному освещены, а в крайнем положении освещено только одно из них. В результате на усилитель подается ток, который после усиления воздействует на записывающее устройство.

В весовых методах образцы для взвешивания отбирают через 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000 ч. При высоких температурах образцы можно отбирать и в соответствии с другим временным рядом, через меньшее количество часов. Однако числа ряда должны составлять геометрическую прогрессию, а общее время испытаний должно быть достаточным для выявления закономерностей окисления.

Продукты окисления при испытаниях по уменьшению массы образца полностью удаляют с поверхности покрытия в соответствии с ГОСТ 6130 и ГОСТ 9.907. Возможны три метода удаления: механический (щеткой, резинкой, сотрясением в вибрационных металлических ситах); химический (растворением в растворах определенного состава) и электрохимический (под действием постоянного тока в электролите соответствующего состава). Механический метод применяют как вспомогательный для удаления верхних слоев продуктов окисления. Оставшиеся продукты окисления удаляют химическим или электрохимическим путем.

При непосредственном измерении глубины коррозии, места вырезки шлифов на образцах выбирают после снятия с них продуктов окисления. С помощью лупы находят участки с наибольшей глубиной коррозии. В этих местах вырезают шлифы таким образом, чтобы их плоскости проходили через возможно большее количество крупных язв. Глубину язв после испытаний оценивают на металлографическом микроскопе по трем сечениям. В зависимости от средней глубины язв выбирают следующие увеличения: глубина до 20 мкм--500-1000 крат, свыше 20 мкм --200 крат. При визуальном и металлографическом анализе на шлифе различают зону полной коррозии, подлежащую удалению, и зону частичной коррозии

(подокисленный слой), учитываемую при измерениях. Глубину коррозии определяют по уменьшению толщины образца с учетом зоны частичного окисления. При отсутствии зоны полного окисления зону частичного окисления измеряют от края шлифа до неокисленной структуры металла.

При равномерной коррозии весовыми методами по ГОСТ 21910 определяют следующие характеристики жаростойкости: глубину равномерной коррозии, h , м (мм, мкм); средние скорости потери $\bar{V}_g$ или прироста $\bar{V}_{гж}$ массы, кг/(м²с), [г/(м²сут), г/м²ч), г/(см²сут), мг/(см²сут)]; среднюю скорость проникновения коррозии $\bar{V}_h$, м/с (мм/год, мкм/ч); удельные потеря g или прирост $g_{ж}$ массы, кг/м² (г/см², г/м², мг/см²);

$$g = \frac{(m_0 - m)}{S}, \quad g_{ж} = \frac{(m_{ж} - m_0)}{S}, \quad (7.2)$$

где массы образца: m_0 - до коррозионного испытания; после испытания в течение заданного интервала времени; m - без продуктов окисления (коррозии); $m_{ж}$ - с продуктами окисления (коррозии); S - площадь окисляемой (корродирующей) поверхности образца.

$$h = \frac{g}{\rho} = \frac{(m_0 - m)}{\rho S}, \quad (7.3)$$

ρ - плотность корродирующего материала;

$$V_g = \frac{g_2 - g_1}{t_2 - t_1} = \frac{m_2 - m_1}{S(t_2 - t_1)}; \quad (7.4)$$

$$V_{gж} = \frac{g_{ж2} - g_{ж1}}{t_2 - t_1} = \frac{m_{ж2} - m_{ж1}}{S(t_2 - t_1)}, \quad (7.5)$$

$t_2 - t_1$ - продолжительность испытания.

$$\bar{V}_h = \frac{h_2 - h_1}{t_2 - t_1} = \frac{g_2 - g_1}{\rho(t_2 - t_1)}. \quad (7.6)$$

Жаростойкость при язвенной коррозии характеризуется следующими количественными показателями: максимальной глубиной язв $h_{Яmax}$, м (мм, мкм); средней глубиной язв, $\bar{h}_Я$ м (мм, мкм); степенью язвенной коррозии $K_Я$; плотностью язв на поверхности m^{-2} ($см^{-2}$, $мм^{-2}$); средней скоростью роста максимально глубоких язв $\bar{V}_{Яmax}$, м/с (мм/год, мкм/ч).

$$\bar{h}_Я = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_{Яi} , \quad (7.7)$$

где N - число измерений; $h_{Яi}$ - глубина отдельной язвы;

$$K_Я = \frac{\bar{h}_Я}{h} = \frac{\rho \cdot S \sum_{i=1}^N h_{Яi}}{N(m_0 - m)} ; \quad \rho_Я = \frac{N_Я}{S} , \quad (7.8)$$

где $N_Я$ - число язв;

$$\bar{V}_{Яmax} = \frac{h_{Яmax2} - h_{Яmax1}}{t_2 - t_1} . \quad (7.9)$$

ГОСТ 21910 устанавливает также другие характеристики жаростойкости при равномерной и местной коррозии. В качестве косвенных показателей используются объем или масса поглощенного (восстановленного) газа, изменение физических свойств покрытий и т.д. В этом случае следует предварительно установить связь между применяемыми показателями и характеристиками газовой коррозии и жаростойкости.

Критерии жаростойкости могут использоваться для сравнительной оценки защитных свойств материалов, прогнозирования срока службы изделия в реальных условиях эксплуатации при высокой температуре в окислительной среде, выявления закономерностей газовой коррозии.

8.2. Коррозионная стойкость

8.2.1. Понятия и определения

Согласно ГОСТ 5272 *коррозия* - это разрушение материала вследствие химического или электрохимического взаимодействия с коррозионной средой.

По степени пораженности различают *сплошную* и *местную коррозии*. *Сплошная коррозия* может быть равномерной и неравномерной и протекать соответственно с одной или разными скоростями на различных участках поверхности.

Разновидности местной коррозии - *питтинговая (точечная) и коррозия пятнами*. Очаги точечной коррозии имеют размеры до 1,5 мм, коррозия пятнами захватывает большую площадь и может приводить к вздутиям и отслоениям коррозионностойкого покрытия. Если имеет место электрохимическое взаимодействие, то возникает контактная коррозия. Она обусловлена контактом материалов с разными стационарными потенциалами в данном электролите, образующими своеобразный микрогальванический элемент.

Щелевая коррозия проявляется в ускоренном разрушении щелей и зазоров между двумя металлами, а также в местах неплотного контакта металла с неметаллическим коррозионно-инертным материалом. При щелевой коррозии, так же как и при точечной, на микроучастках (в щелях) создаются благоприятные условия для развития коррозионных процессов, заключающиеся в локальном росте концентрации агрессивных элементов.

Межкристаллитная коррозия распространяется по границам кристаллитов (зерен) металла. Коррозионное растрескивание проявляется при одновременном воздействии коррозионной среды и внешних или внутренних механических напряжений растяжения с образованием транскристаллитных или межкристаллитных трещин.

Используется также понятие коррозионная усталость - понижение предела выносливости, возникающее при одновременном воздействии циклических растягивающих напряжений и коррозионной среды. Под

пределом коррозионной выносливости понимают максимальное механическое напряжение, при котором металл после одновременного воздействия определенного количества циклов переменной нагрузки и заданных коррозионных условий еще не разрушается.

Внутренние (состав, структура, остаточные напряжения, состояние поверхности) и внешние (температура, давление, состав среды, скорость перемещения образцов относительно среды) факторы влияют на скорость, вид и распределение коррозии, как в газовой атмосфере, так и в жидкой коррозионной среде.

8.2.2. Образцы, оборудование, испытания

Задачи коррозионных испытаний сводятся к получению характеристик коррозионной стойкости материала; прогнозирование срока службы изделия в реальных условиях эксплуатации; изучение кинетики коррозионных процессов. Наибольшее распространение получили методы коррозионных испытаний образцов-свидетелей, измерения электросопротивления, электрохимических измерений, неразрушающие и аналитические. Чаще всего используют метод образцов-свидетелей, который позволяет сравнительно легко не только определять потерю (прирост) массы, но и исследовать продукты коррозии, оценивать число и расположение питтингов, визуально интерпретировать характер коррозионных разрушений.

Метод измерения электросопротивления основан на регистрации изменения электрического сопротивления, вызванного уменьшением сечения образца и ухудшением его электропроводимости, используемый исключительно для электропроводных материалов. Электрохимические методы позволяют судить не только о средней, но и о "мгновенной" скорости коррозии в электропроводной среде. Для агрессивных сред-неэлектролитов они не пригодны. Применение для неразрушающих коррозионных испытаний ультразвука и вихревых токов дает хотя и оперативные, но

слишком приблизительные результаты. Аналитические методы основаны на химическом анализе проб коррозионной среды.

Коррозионные испытания установлены соответствующими стандартами, входящими в Единую систему защиты от коррозии, старения и биоповреждений (ЕСЗКС). ЕСЗКС должна обеспечивать заданный уровень качества изделий и материалов соответствующими средствами и методами. В единую систему входят более 120 стандартов.

Особое внимание уделяют вопросам обеспечения нормальной работы материалов в различных природных условиях. Влияние атмосферных факторов изучают на испытательных климатических станциях. Их тип, требования к размещению, оборудованию и метрологическому обеспечению устанавливает ГОСТ 9.906. Станции в зависимости от атмосферных условий делят на три типа: наземные (для любых климатических районов на суше); береговые (у среза воды океанов, морей и водоемов); надводные плавающие и стационарные (в атмосферных условиях или в воде).

Наземные и береговые станции рекомендуется размещать в основных и (или) экстремальных пунктах климатических районов. Надводные плавающие станции устанавливают на специальных судах, район плавания которых определяется программой испытания образцов. Надводные стационарные станции устраивают на побережьях водоемов, на гидротехнических сооружениях. Стандарт устанавливает тип оборудования для проведения комплекса метеорологических наблюдений: температуры воздуха; интенсивности и продолжительности воздействия атмосферных осадков; солнечного излучения; атмосферного давления, скорости и направления ветра; концентрации озона; сернистого газа, хлоридов и пыли; анализа морской и пресной воды.

Значения параметров коррозионной агрессивности атмосферы для нескольких десятков пунктов на территории РФ, расположенных в различных климатических зонах (холодной, умеренной, теплой, влажной и

жаркой) определяют по ГОСТ 9.039. Обычно оценивают влияние двух факторов: увлажнения поверхности и загрязнения воздуха коррозионно-активными агентами -- сернистым газом, хлоридами, аммиаком, оксидами азота. В стандарте для многих пунктов приведены данные о продолжительности увлажнения поверхности фазовой и адсорбционной пленками влаги. Также рассмотрены методики определения содержания в воздухе сернистого газа, хлорида и аммиака.

Условия эксплуатации изделий в атмосфере в соответствии с ГОСТ 14007 разделены на четыре группы: легкая, средняя, жесткая и очень жесткая. В основе классификации лежит степень воздействия факторов, определяющих коррозионную агрессивность атмосферы: загрязнение воздуха коррозионно-активными агентами (содержание сернистого газа и хлористых солей в сельской, промышленной и морской атмосферах); макроклиматический район, в котором эксплуатируется изделие (климат--умеренный, холодный, сухой, влажный тропический); условия размещения изделий (на открытом воздухе, под навесом, в закрытых помещениях).

На основе данных о коррозионной агрессивности атмосферы в конкретном пункте и используя расчетно-экспериментальный метод в соответствии с ГОСТ 9.040, оценивают коррозионные потери в первый год эксплуатации.

Ускоренные испытания на атмосферную коррозию по ГОСТ 9.012 возможны в искусственно создаваемых условиях, имитирующих воздействие климатических факторов атмосферы. Предлагаются следующие методы испытаний:

- при повышенных значениях относительной влажности воздуха и температуры;
- без конденсации влаги;
- с периодической конденсацией;
- при воздействиях сернистого газа;
- при воздействии соляного тумана;

- при переменном погружении в электролит.

Методы выбирают с учетом группы условий эксплуатации изделий с покрытиями для сельской, промышленной или морской атмосфер по ГОСТ 14007.

Приборы для ускоренных испытаний на атмосферную коррозию по ГОСТ 9.012 должны автоматически поддерживать заданные параметры режима исследований: температуру, относительную влажность воздуха, концентрацию сернистого газа и соляного тумана.

В оборудование для воспроизведения климатических факторов входят: термокамеры, термовлагокамеры, камеры морского (соляного) тумана, термовлагобарокамеры и др.

Температуру обычно регулируют, периодически включая электрические нагреватели или холодильники. Заданную влажность воздуха поддерживают одним из трех способов: испарением воды с открытой свободной поверхности; путем циркуляции воздуха через увлажнительное устройство; подачей пара. Необходимую водность (число капель влаги в единице объема) и дисперсность морского (соляного) тумана создают, циклически распыляя растворы солей пульверизатором или центрифугой аэрозольного аппарата. Для распыления применяют раствор следующего состава (в г/л): 27 – NaCl; 6 – MgCl₂; 1 – CaCl₂; 1 – KCl. Заданную концентрацию сернистого газа поддерживают, периодически подавая его из баллона. Для осаждения влаги на образцах их охлаждают в течение второй части цикла испытаний. Конденсированная влага должна равномерно оседать на все исследуемые поверхности.

Для испытаний при переменном погружении служат установки типа "коррозионное колесо" или "штоковое коромысло", состоящие из ванны с электролитом и механизма переменного погружения и подъема установленных в нем образцов (рис. 8.3).

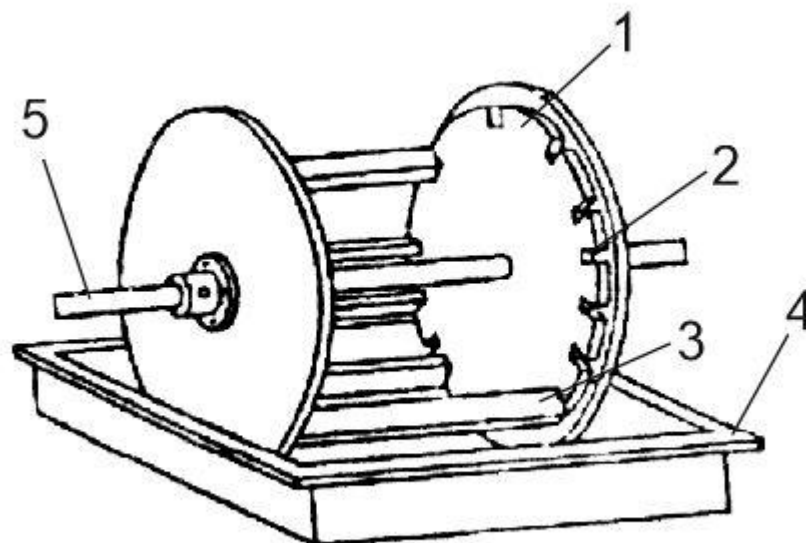


Рис. 8.3 – Схема установки для ускоренных испытаний при периодическом погружении в электролит:

1 – вращающийся диск; 2 – прорезы для крепления образцов; 3 – образец; 4 – ванна для электролита; 5 – вращающийся вал.

Глубину очагов коррозии рекомендуется измерять одним из трех способов: на продольном или поперечном шлифах с помощью микроскопа с калибровочным микрометрическим винтом (по глубине резкости); индикаторным глубиномером; на поперечном шлифе с помощью микроскопа.

Основным оборудованием для исследования сплошной, питинговой (точечной), межкристаллитной коррозии и коррозии пятнами являются эксикаторы, гидростаты и влажные камеры (рис. 8.4).

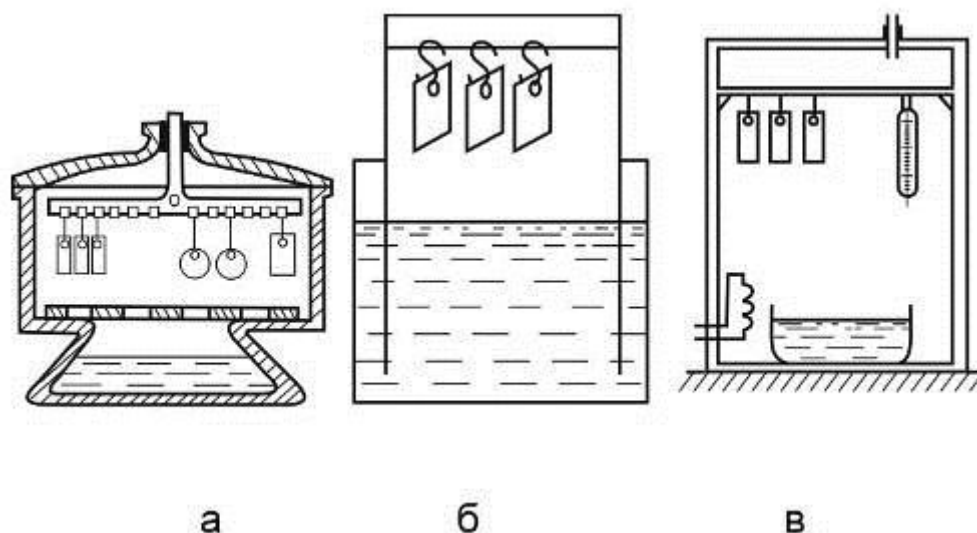


Рис. 8.4 – Простейшие устройства для испытания во влажной атмосфере:

а – эксикатор; б – гидростат; в – влажная камера

При выборе агрессивной атмосферы для ускоренных испытаний на атмосферную коррозию особое внимание следует обратить на то, чтобы условия испытаний были максимально близки к естественным условиям эксплуатации. Необходимо обеспечить циркуляцию агрессивной среды и обновление ее состава. если последнее невозможно, то надо предусмотреть периодическую замену среды. Продолжительность испытаний образцов - не менее 2 лет.

Образцы устанавливают на стеллажах под заданным углом или вертикально, с учетом розы ветров. В течение первых десяти дней их осматривают ежедневно, далее в течение первого месяца - еженедельно, а затем - через 2,3,6,9,12,24 месяцев и т.д.

Основным оборудованием для исследований в жидкой коррозионной среде сплошной, питтинговой, межкристаллитной коррозий и коррозии пятнами являются эксикаторы и термостаты, образцы в которых располагают согласно схеме, изображенной на **рис.8.5**.

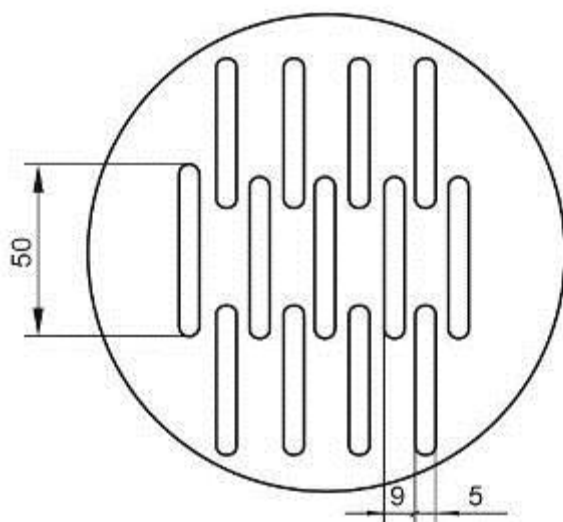


Рис. 8.5 – Расположение образцов в пазах подставки эксикатора

Коррозионное растрескивание и коррозию под напряжением можно изучать на специальной установке (рис.8.6), позволяющей варьировать температуру агрессивной среды и механическое напряжение (разработана Н.П.Харитоновым с сотр.). Образец 7 устанавливают в специальной обойме 4 и нагружают тарированной пружиной 6, защищенной кожухом 5. Агрессивная среда подается в емкость 1, изготовленной из коррозионно-стойкой стали. Температуру и вид воздействия среды (жидкость, паровая или паровоздушная фаза) регулируют, включая электронагреватель 8 и холодильник 2. Уровень раствора (под образцом или при наличии ватерлинии - над образцом) контролируют уровнемером 9, температуру испытаний – термопреобразователем 3.

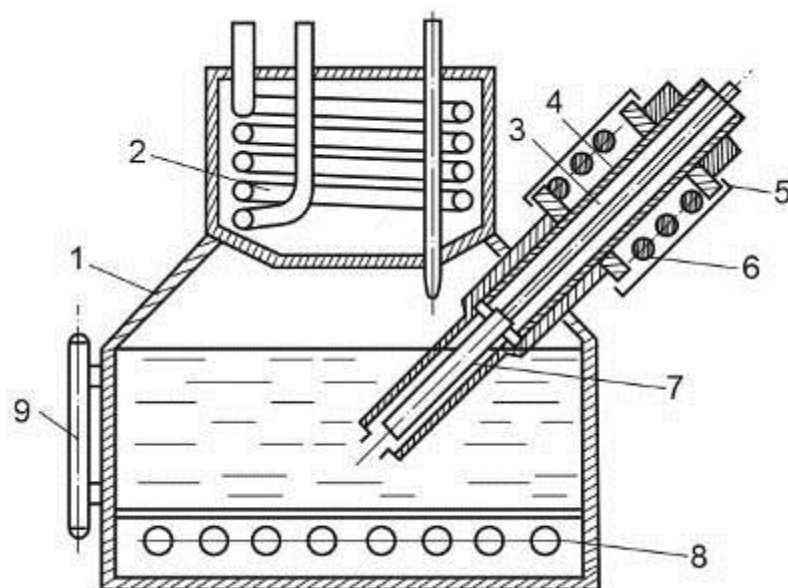


Рис. 8.6 – Установка для испытаний на коррозионное растрескивание и коррозию под напряжением: 1 - емкость; 2 - холодильник; 3 - термопреобразователь; 4 - обойма для крепления образцов; 5 - защитный кожух; 6 - тарированная пружина; 7 - образец; 8 - электронагреватель; 9 – уровнемер.

Оценка коррозионного поведения может быть количественной, полуколичественной (балльной) и качественной. При невозможности или нецелесообразности вычисления количественных показателей (главный из которых - время достижения заданной степени коррозионного поражения в определенных условиях), можно использовать полуколичественные или качественные показатели. Следует отметить, что коррозионные процессы достаточно случайны и обычно отличаются большим разбросом данных. Это особенно характерно для малых скоростных показателей коррозии и малой продолжительности испытаний.

При визуальном осмотре отмечают следующие качественные изменения: потускнение поверхности без видимых продуктов коррозии; наличие и характер налета продуктов коррозии (равномерный,

неравномерный, цвет), слоя продуктов коррозии (равномерный, неравномерный, плотный, рыхлый, сыпающийся, цвет).

Для ряда коррозионных эффектов (интегральных показателей коррозии) приведены соответствующие им скоростные (дифференциальные) показатели коррозии (ГОСТ 9.908). При линейной зависимости коррозионного эффекта от времени скоростной показатель находят из отношения изменения коррозионного эффекта за определенный интервал времени к величине этого интервала. При нелинейной зависимости коррозионного эффекта от времени скоростной показатель коррозии находят как первую производную по времени графическим или аналитическим способами.

Показатели коррозионной стойкости, отмеченные в табл.8.1 знаком*, определяют из временной зависимости соответствующего интегрального показателя коррозии графическим способом (рис.8.7) или аналитически, из его эмпирической временной зависимости $U=f(\tau)$, находя для допустимого (заданного $U_{дон}$) соответствующую величину $\tau_{дон}$.

Таблица 8.1

Показатели коррозионного поведения материала в зависимости от вида коррозии (ГОСТ 9.908)

Вид коррозии	Основные количественные показатели коррозии и коррозионной стойкости		
	Коррозионный эффект (интегральный показатель коррозии)	Скоростной (дифференциальный) показатель коррозии	Показатель коррозионной стойкости
Сплошная коррозия	Глубина проникновения коррозии	Линейная скорость коррозии	Время проникновения коррозии на допустимую (заданную) глубину*
	Потеря массы на единицу площади	Скорость убыли массы	Время до уменьшения массы на

Вид коррозии	Основные количественные показатели коррозии и коррозионной стойкости		
	Коррозионный эффект (интегральный показатель коррозии)	Скоростной (дифференциальный) показатель коррозии	Показатель коррозионной стойкости
			допустимую (заданную) величину*
Коррозия пятнами	Степень поражения поверхности		Время достижения допустимой (заданной) степени поражения*
Питтинговая коррозия	Максимальная глубина питтинга	Максимальная скорость проникновения питтинга	Минимальное время проникновения питтингов на допустимую (заданную) глубину*
	Максимальный размер поперечника питтинга в устье		Минимальное время достижения допустимого (заданного) размера поперечника питтинга в устье*
	Степень поражения поверхности питтингами		Время достижения допустимой (заданной) степени поражения*
Межкристаллитная коррозия	Глубина проникновения коррозии	Скорость проникновения коррозии	Время проникновения на допустимую (заданную) глубину*
	Снижение механических свойств		Время снижения механических свойств до

Вид коррозии	Основные количественные показатели коррозии и коррозионной стойкости		
	Коррозионный эффект (интегральный показатель коррозии)	Скоростной (дифференциальный) показатель коррозии	Показатель коррозионной стойкости
	(относительного удлинения, сужения, ударной вязкости, временного сопротивления разрыву)		допустимого (заданного) уровня*
Коррозионное растрескивание	Глубина (длина) трещин	Скорость роста трещин	Время до появления первой трещины**
	Снижение механических свойств (относительного удлинения, сужения)		Время до разрушения образца** Уровень безопасных напряжений** (условный предел длительной коррозионной прочности**) Пороговый коэффициент интенсивности напряжений при коррозионном растрескивании**
Коррозионная усталость	Глубина (длина) трещин	Скорость роста трещин	Количество циклов до разрушения образца** Условный предел коррозионной

Вид коррозии	Основные количественные показатели коррозии и коррозионной стойкости		
	Коррозионный эффект (интегральный показатель коррозии)	Скоростной (дифференциальный) показатель коррозии	Показатель коррозионной стойкости
			усталости** Пороговый коэффициент интенсивности напряжений при коррозионной усталости**
Расслаивающая коррозия	Степень поражения поверхности отслоениями		-
	Суммарная длина торцов с трещинами		
	Глубина проникновения коррозии	Скорость проникновения коррозии	

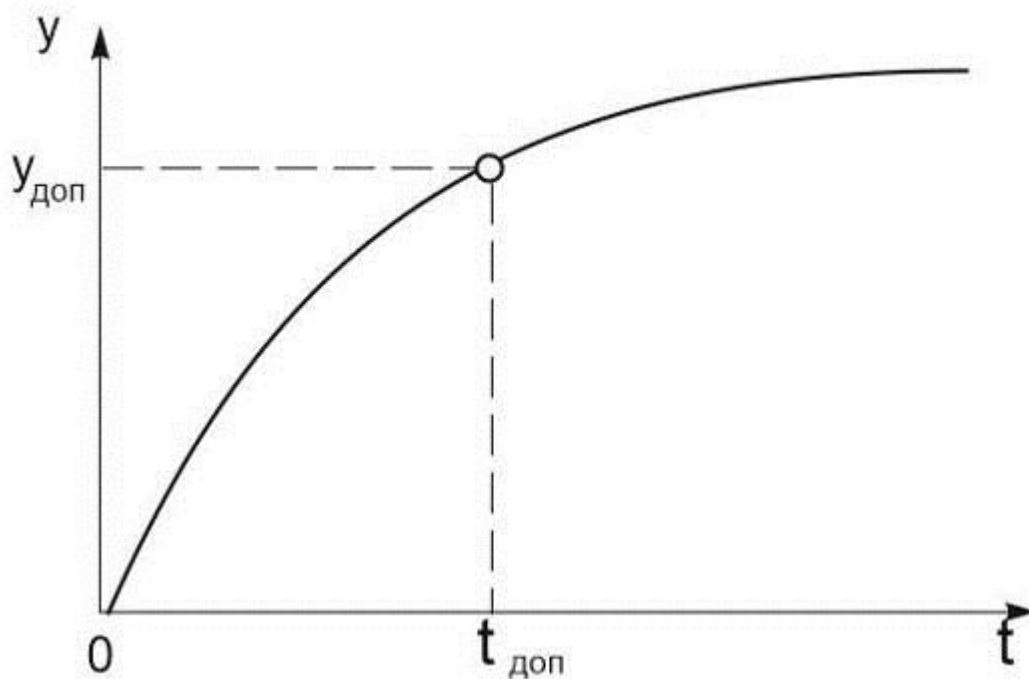


Рис. 8.7 – Зависимость коррозионного эффекта (интегрального показателя) Y от времени

Показатели коррозионной стойкости при воздействии механических факторов, в том числе остаточных напряжений, отмеченные в табл.7.3 знаком **, определяют непосредственно в коррозионных испытаниях. Если фиксируют различные виды коррозии, то определяют соответствующие им показатели коррозии и коррозионной стойкости.

Интегральный показатель коррозии пятнами определяют двумя способами: планиметрированием и с помощью сетки квадратов. В первом - планиметром измеряют площадь каждого пятна. Во втором - поверхность плоского образца пересекают параллельными линиями на расстоянии не менее 1 мм и не более 5 мм в зависимости от размеров преобладающих пятен коррозии. Степень поражения покрытия пятнами коррозии (%) вычисляют по формулам:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S} \cdot 100 ; G = \frac{n_{жс}}{N_{жс}} \cdot 100. \quad (8.1)$$

где S_i - площадь i -го пятна, мм²; n - количество пятен; S - площадь поверхности образца, мм²; $n_{жс}$ - сумма длин отрезков, приходящихся на коррозионные пятна, мм; $N_{жс}$ - сумма длин всех линий на поверхности образца, мм.

Глубину проникновения межкристаллитной коррозии в основной металл определяют по ГОСТ 6032. Максимальную глубину проникновения питтинговой коррозии по ГОСТ 9.908 находят как среднее арифметическое глубин наиболее глубоких питтингов в зависимости от их количества n на поверхности: при $n < 10$ измеряют 1...2 питтинга; при $n < 20$ – 3...4; при $n > 20$ измеряют 5 питтингов. Степень поражения коррозии выражают долей поверхности (%), занятой питтингами.

При отслаивании защитных металлических покрытий от основного металла показатель коррозии K_x , (%), вычисляют по ГОСТ 9.076 по формуле:

$$K_x = \frac{10}{\lg(100 - S_{отсл})}, \quad (8.2)$$

где $S_{отсл}$ - отношение площади, на которой произошло отслаивание покрытия, к общей оцениваемой площади, %.

При протекании сплошной коррозии с постоянной скоростью показатели коррозионной стойкости – время τ_m , (годы) до уменьшения массы на единицу площади на допустимую (заданную) величину в граммах и время τ_i проникновения на допустимую (заданную) глубину, определяют по формулам:

$$\tau_m = \frac{\Delta m}{V_m} ; \quad \tau_i = \frac{\Delta i}{Vi} \quad (8.3)$$

где Δ_m - потеря массы на единицу площади поверхности, кг/м²; Δ_l - глубина проникновения коррозии, м; V_m - скорость убыли массы, кг/(м² · год); V_l - линейная скорость коррозии, м/год.

Гравиметрический (весовой) метод весьма прост, но при одновременном течении сплошной и питтинговой коррозии он ненадежен. Объективную информацию о коррозионном поведении материала при этом можно получить, имея одновременно данные о потере массы, изменения которой усредняются по всей поверхности, и о максимальной глубине питтингов, роль которых в данном случае может быть решающей.

Сопоставимыми являются результаты, полученные при одинаковом виде коррозии, и при одинаковых условиях испытаний. Если при испытаниях различных материалов отмечаются несколько видов коррозии, то полученные значения количественных показателей статистически неоднородны и сравниваться не могут.

Наряду с испытаниями, задача которых состоит в получении зависимости показатель коррозии — время, существуют и другие методы оценки коррозии. Самые распространенные среди них электрохимические: гальваностатический и потенциостатический.

Гальваностатический метод заключается в снятии поляризационных кривых в процессе коррозии исследуемого металла. Потенциал измеряют любым из известных способов, например, с помощью вольтметра или потенциостата. По характеру поляризационных кривых судят о поляризуемости исследуемого металла в качестве катода или анода, о возможной роли катодных и анодных реакций в процессе коррозии. Анализ изменения потенциала металла в зависимости от кислотности и состава раствора, природы добавок, температуры и других факторов позволяет получить важные сведения о влиянии этих факторов на скорость коррозионного процесса, выделить стадии, лимитирующие скорость коррозии, и разработать наиболее эффективные методы защиты от коррозии.

Как полагают И. М. Ковенский и В. В. Поветкин для металлов, склонных к пассивации, метод снятия гальваностатических кривых является несовершенным, поскольку не отражает истинной картины чередования анодных реакций. В этих случаях удобнее использовать метод снятия потенциостатических поляризационных кривых. Типичная потенциостатическая кривая, построенная по данным зависимости ток— время, для ряда значений потенциала приведена на рис. 8.8. Как видно из рисунка, при смещении потенциала в область положительных значений в интервале $E_a—E_n$ скорость растворения металла возрастает. По достижении потенциала начала перепассивации E_{nn} процесс резко замедляется, скорость анодной реакции падает до j_n наступает полная пассивация металла.

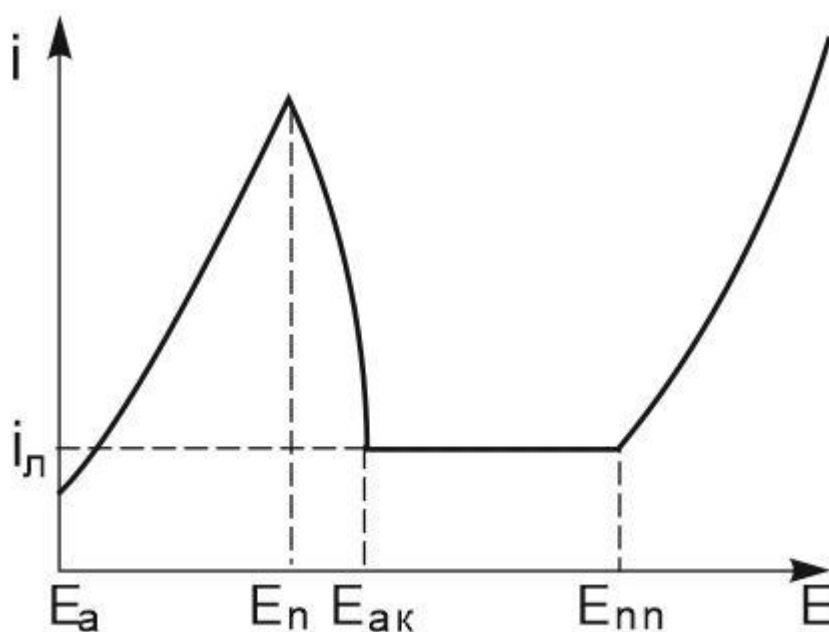


Рис. 8.8 – Типичная анодная поляризационная кривая: E_a – потенциал активного анода; E_n – потенциал начала пассивации; $E_{ак}$ – потенциал активации; E_{nn} – потенциал перепассивации; j_n – плотность тока пассивации

Выше потенциала перепассивации E_{III} металл начинает растворяться со все возрастающей скоростью, причем электродные реакции в этом случае отличаются от реакций в области анодной активности ($E_a—E_{II}$). В состоянии перепассивации металл, как правило, растворяется с образованием ионов более высокой валентности. Иногда наступает вторая область пассивности или же начинается анодное выделение кислорода. Данные, получаемые при помощи потенциостатического метода, позволяют выявлять области активного и пассивного состояния металла в зависимости от условий эксплуатации, а также обосновать целесообразность и способы анодной защиты от коррозии.

Как уже указывалось выше многие методы коррозионных испытаний регламентированы соответствующими национальными и Российскими стандартами, входящими в Единую систему защиты от коррозии, старения и биоповреждения (ЕСЗКСБ). Единая система обеспечивает заданный уровень качества изделий и материалов средствами и методами защиты от коррозии, старения и биоповреждений с учетом требований обороны страны и конкурентной способности изделий на мировом рынке.

Список литературы

1. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: Справочник в 2 т. / Под ред. А.А.Герасименко. - М.: Машиностроение, 1987. - 688 с.
2. Испытательная техника: Справочник в 2 кн. Кн.1. / Под ред. В.В. Ключева. - М.: Машиностроение, 1982. - 528 с.
3. Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. Коррозия и защита от коррозии. - М.:Физматлит, 2002. - 335 с.
4. Сокол И.Я., Ульянин Е.А., Фельдгандлер Э.Г. Структура и коррозия металлов и сплавов. - М.:Металлургия,1989. - 314 с.

5. Способы защиты оборудования от коррозии: Справочное руководство / Под ред. Б.В. Строкана, А.М.Сухотина. - Л.: Химия, 1987. - 280 с.

6. Тушинский Л. И., Плохов А. В., Синдеев В. И. Защитные свойства поверхностных слоев после высокоэнергетических воздействий. Учебное пособие.- Новосибирск: НГТУ, 1996.- 193с.

7. Улиг Г.Г., Ревя Р.У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику. - М.: Химия, 1989. - 456 с.

8. Schweitzer P.A. Metallic Materials: Physical, Mechanical, and Corrosion Properties. - New York: Marcel Dekker, 2003. - 702 p.

9. Технологические испытания

9.1. Лист и лента

Технологические испытания (пробы) – приближенные и достаточно простые способы испытания, позволяющие оценить пригодность изделий и материалов для конкретных технологических процессов. Пробы обычно выполняют для оценки способности изделия или материала подвергаться деформации, подобной той, которая будет при последующей обработке. Технологические испытания не заменяют контрольных и чаще всего являются экспресс-анализом изделий и материалов. Испытывают всевозможную продукцию машиностроения: лист, ленту, проволоку, трубы, строительные профили и т. д.

Метод испытания на выдавливание по Эриксену листов и лент толщиной от 0,1 до 2,0 мм при комнатной температуре устанавливает ГОСТ 10510 (ИСО 8490). Метод заключается во вдавливании сферического пуансона в образец, зажатый под действием усилия прижима между матрицей и прижатым кольцом, до начала образования на выдавливаемой лунке сквозной трещины и определения глубины лунки.

Длина образца должна обеспечивать выдавливание необходимого количества лунок (не менее трех) с расстояниями между центрами смежных лунок не менее 55 мм - при ширине ленты менее 90 мм и не менее 90 мм - при ширине ленты или листа 90 мм и более.

Прибор для испытания на выдавливание листов и лент должен обеспечивать: плавное выдавливание лунки и измерение глубины вдавливания пуансона. Пресс Эриксона должен иметь устройства для измерения усилий прижима и выдавливания. Схема испытания на выдавливание по Эриксену листов и лент показана на **рис. 9.1**. Усилие прижима образца между матрицей и прижимным кольцом должно быть 10000 Н.

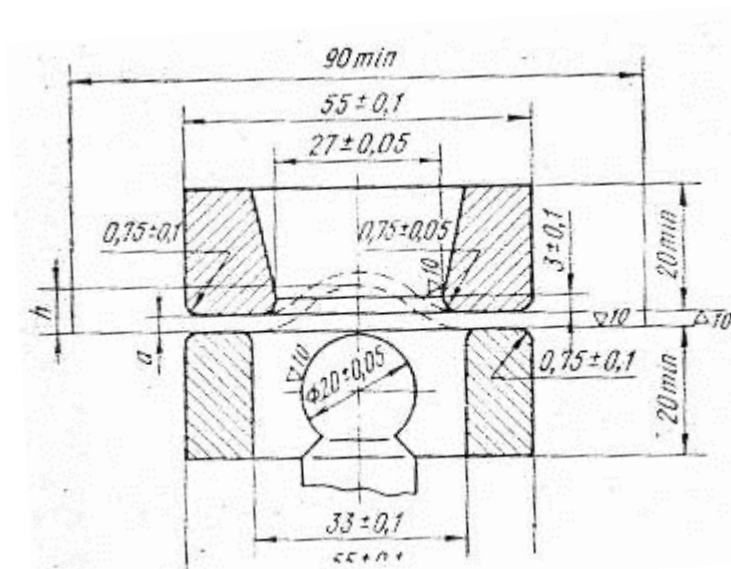


Рисунок 9.1 – Схема испытания на вытяжку по Эриксену

Скорость выдавливания лунки должна быть 5 - 20 мм/мин. Испытание следует заканчивать на минимальных скоростях. Признаком окончания испытания является появление на лунке сквозной трещины, видимой на просвет. Глубина лунки, являющаяся характеристикой материала при испытании по методу Эриксена, определяется с погрешностью не более 0,1 мм. Качество металла оценивают по среднему арифметическому из полученных значений глубин лунок.

Метод испытания на перегиб листов и лент толщиной менее 4 мм при комнатной температуре устанавливает ГОСТ 13813 (ИСО 7799). Испытание состоит в многократном перегибе на 90° от исходного положения в одну и другую сторону образца прямоугольного сечения, закрепленного в зажимах приспособления.

На поверхности образца не допускаются окалина, царапины, трещины и вмятины. Кромки образцов не должны иметь трещин и заусенцев.

Приспособление должно обеспечивать угол загиба образца на $90^\circ \pm 3^\circ$ вправо и влево от вертикали. Первым перегибом считается загиб на 90° от вертикали в любую сторону (вправо и влево) и возвращение в вертикальное положение; вторым перегибом - загиб на 90° от вертикали в

противоположную сторону и снова возвращение в вертикальное положение и т.д. до разрушения образца (рис. 9.2). Испытание на перегиб производят с такой скоростью, чтобы нагрев образца не повлиял на результаты испытания. Скорость испытания должна быть равномерной, не превышающей 60 перегибов в минуту.

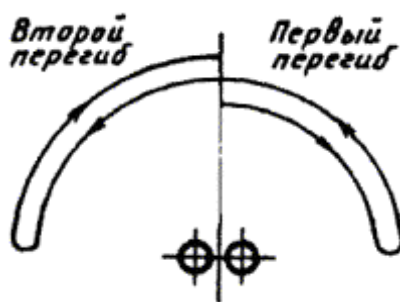


Рис.9.2 – Схема перегибов.

После испытания осматривают кромки и наружную поверхность в месте перегиба. Результаты испытания оценивают по следующим показателям:

- достижению заданного числа перегибов без появления трещины;
- по числу перегибов: до появления трещины на образце; до продвижения трещины до половины ширины образца; до полного разрушения образца.

9.2. Проволока

Существует несколько методов испытаний проволоки. Метод испытания на скручивание при комнатной температуре проволоки диаметром от 0,14 до 10 мм устанавливает ГОСТ 1545. Длина образцов должна быть $100d$, где d -диаметр проволоки. Один из захватов машины для испытаний вращается вокруг оси, не перемещаясь вдоль осевой линии, другой - имеет только продольное перемещение. Машина имеет отсчетное устройство числа оборотов активного захвата и шкалу, позволяющую устанавливать нужное расстояние между захватами.

К образцу проволоки прилагают предварительное натяжение, величина которого не должна превышать 2% от разрывного усилия. За одно скручивание принимается один полный оборот активного захвата машины.

Проводят следующие виды испытаний и контроля: скручивание с переменной направления кручения; скручивание двух рядом сложенных образцов (двойное скручивание); скручивание с определением характера излома и состояния образцов после испытания на скручивание. За результат испытания принимается число скручиваний, которое выдерживает образец до разрушения или без разрушения до заданного числа скручиваний.

ГОСТ 1579 (ИСО 7801) устанавливает требования к методу определения способности проволоки диаметром или характерным размером от 0,3 до 10,0 мм включительно подвергаться пластической деформации при перегибах. Испытание состоит в многократном перегибе на 90° от исходного положения в одну и другую сторону образца, закрепленного с одного конца в зажимах прибора, через цилиндрический валик.

Образцы проволоки фасонного сечения (прямоугольного, зетообразного, иксообразного, клиновидного, трапецевидного профиля) должны быть расположены так, чтобы большой размер был параллелен зажимным губкам, как показано на [рис. 9.3](#).

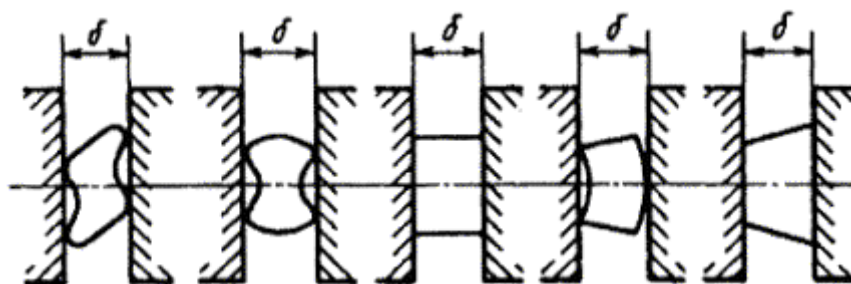


Рис. 9.3 – Схема зажима проволок фасонного сечения: δ - характерный размер фасонной проволоки.

Испытуемый образец перегибают на 90° попеременно в противоположных направлениях. Первым перегибом считается загиб свободного конца испытуемого образца на 90° и возвращение его в исходное

положение. Следующий перегиб проводят в противоположном направлении. Испытывают до заданного числа перегибов или до появления растрескивания, видимого невооруженным глазом, или до полного разрушения образца.

ГОСТ 10447 устанавливает метод определения способности металлической проволоки различной формы поперечного сечения диаметром или толщиной от 0,1 мм до 10 мм включительно подвергаться пластической деформации при навивании. Сущность метода состоит в навивании нескольких витков проволоки в виде плотной спирали вокруг оправки (рис. 9.4).

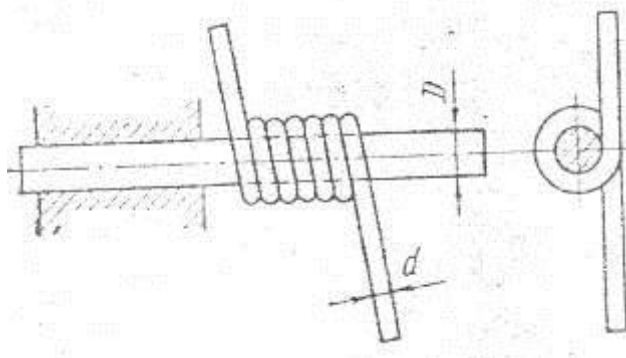


Рис. 9.4 – Схема испытаний на навивание проволоки: D - диаметр оправки; d -диаметр проволоки.

Проволоку навивают без перекручивания плотной спиралью вокруг оправки, вращающейся с постоянной скоростью так, чтобы соседние витки соприкасались. Для более плотной навивки допускается к образцу проволоки прикладывать растягивающее напряжение, величина которого не должна превышать 5% от номинального значения временного сопротивления. На проволоке после навивания не должно быть расслоения, трещин, надрывов.

9.3. Трубы

Многочисленны стандартные способы испытания труб.

ГОСТ 3728 распространяется на металлические трубы круглого сечения и устанавливает метод испытания на загиб по заданным размерам и форме при комнатной температуре.

Испытывают плавным непрерывным загибом образца вокруг оправки заданного радиуса до прямого угла (рис. 9.5). Радиусы оправки для загиба образцов выбирают в зависимости от толщины стенки трубы. Образец считается выдержавшим испытание, если после загиба на нем не будет визуально обнаружено нарушение целостности металла.

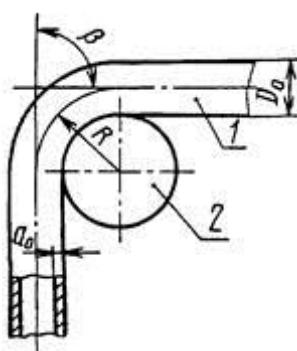


Рис. 9.5 – Схема испытания труб на загиб: 1 - образец-патрубок; 2 - цилиндрическая оправка; R - радиус загиба трубы на средней линии; D_0 - наружный диаметр трубы; a_0 - толщина стенки трубы; β - угол загиба

Метод испытания на бортование металлических бесшовных сварных труб с наружным диаметром до 160 мм включительно с толщиной стенки не более 9,0 мм устанавливает ГОСТ 8693 (ИСО 8494). Испытание на бортование состоит в отбортовке конца (отрезка трубы) до образования фланца заданного диаметра или получения величины отбортовки в процентах от внутреннего диаметра.

Испытание проводят плавной отбортовкой на 90° к образующей образца (рис.9.6) Перед отбортовкой образец может подвергаться раздаче конусной оправкой до образования наружного диаметра, обеспечивающего

получение заданного или определяемого диаметра борта с последующим отгибом края образца плоской поверхностью.

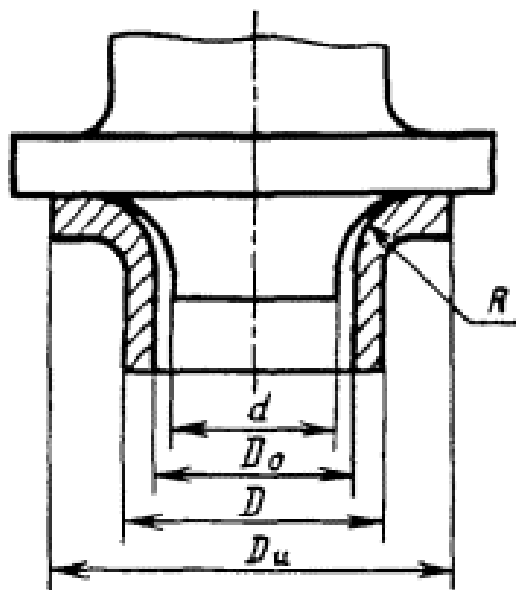


Рис. 9.6 – Схема испытания на бортование металлических бесшовных сварных труб: D_u - максимальный диаметр борта; D - наружный диаметр трубы; D_o - внутренний диаметр трубы; d - диаметр оправки; R - радиус борта.

Результаты испытаний определяют по величине максимального диаметра борта (D_u) после испытания, по величине отбортовки X , (%) от внутреннего диаметра трубы (D_o) по формуле

$$X = \frac{D_u - D_o}{D_o} \cdot 100 \quad (9.1)$$

Образец считают выдержавшим испытание, если после отбортовки в нем отсутствуют трещины или надрывы, видимые без применения увеличительных приборов.

ГОСТ 8694 (ИСО Р 166) устанавливает метод испытания на раздачу и распространяется на металлические бесшовные и сварные трубы круглого сечения с толщиной стенки не более 9,0 мм и диаметром трубы не более 150 мм (рис. 9.7).

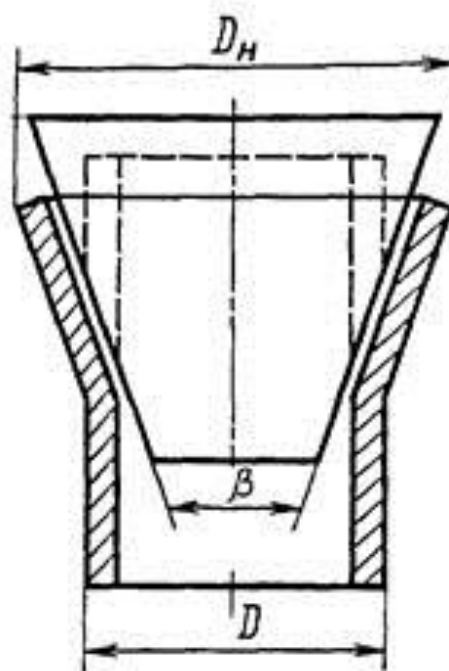


Рис. 9.7 – Схема испытания труб на раздачу: D - начальный наружный диаметр образца; D_H - конечный наружный диаметр образца; β - угол конусности оправки, град.

Скорость внедрения оправки в образец должна быть 20-50 мм/мин. Испытание проводят плавной раздачей конца образца оправкой с заданным углом конусности до получения у торца образца заданного наружного диаметра.

Признаком того, что образец выдержал испытание, служит отсутствие на нем после раздачи на заданную величину трещин или надрывов, определяемых визуально. Величину раздачи X (%), вычисляют по формуле

$$X = \frac{D_H - D}{D} \cdot 100. \quad (9.2)$$

ГОСТ 8695 (ИСО Р 202) распространяется на металлические бесшовные и сварные трубы с наружным диаметром не более 400 мм и с толщиной стенки не более 15% от наружного диаметра трубы и устанавливает метод испытания на сплющивание. Применяют образцы в виде отрезков трубы длиной 20-50 мм. Для испытания образец помещают между двумя гладкими жесткими и параллельными плоскостями и плавно

сплющивают его, сближая сжимающие плоскости до заданного расстояния H (рис. 9.8).



Рис. 9.8 - Схема испытания труб: а - бесшовная труба; б - сварная труба.

Сварной шов при испытаниях располагают под углом 90° к оси приложения нагрузки. Скорость сплющивания образца должна быть не более 25 мм/мин. Признаком того, что образец выдержал испытание, служит отсутствие после сближения сжимаемых поверхностей до величины H на внешней и внутренней поверхностях трещин или надрывов, определяемых визуально.

9. 4. Испытания на осадку и изгиб проката

Метод испытания на осадку сортового проката и проволоки из черных и цветных металлов в холодном и горячем состояниях устанавливает ГОСТ 8817. Сущность метода состоит в осадке образца под действием сжимающего усилия вдоль его оси при нормальной или повышенной температуре и служит для определения способности металла выдерживать заданную относительную степень деформации, а также для выявления поверхностных дефектов (рис. 9.9).

Основной параметр поперечного сечения образца d (диаметр, толщина, сторона квадрата, диаметр вписанного круга) должен составлять: от 3 до 30 мм - для испытания в холодном состоянии; от 5 до 200 мм - для испытания в горячем состоянии.

Высота образцов для испытания на осадку должна быть равна двум основным параметрам поперечного сечения для черных металлов и полутора основным параметрам поперечного сечения - для цветных металлов

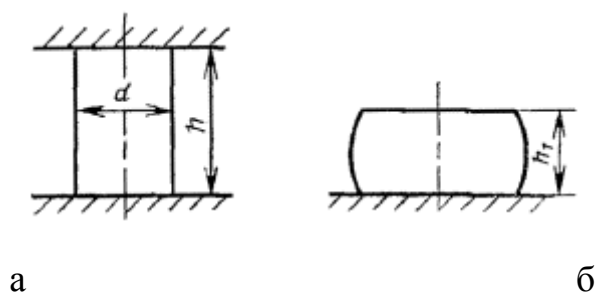


Рис. 9.9 – Форма образца до (а) и после (б) испытаний на осадку.

Испытания проводят при статической или динамической нагрузке до достижения образцом конечной высоты (h_1), мм, вычисляемой по формуле

$$h_1 = h \left(1 - \frac{X}{100} \right), \quad (9.3)$$

где h - высота образца до осадки, мм;

X - относительная деформация, %.

Величина относительной деформации 50, 65 или 75 % для черных металлов и 65 % - для цветных металлов. Образец считается выдержавшим испытание, если после достижения заданной относительной степени деформации при осадке на боковой поверхности образца не наблюдается возникших или раскрывшихся трещин, закатов, надрывов.

Метод определения способности металлических материалов выдерживать пластическую деформацию при изгибе устанавливает ГОСТ 14019 (ИСО 7438). Испытание на изгиб заключается в пластической деформации образца круглого, квадратного, прямоугольного или многоугольного сечения путем изгиба без изменения направления действия силы до достижения заданного угла изгиба. При изгибе на 180° две боковые поверхности могут соприкаться друг с другом или быть параллельными, находясь одна от другой на заданном расстоянии; для контроля этого расстояния применяют прокладку.

Испытание на изгиб проводят на универсальных испытательных машинах или прессах:

- до достижения заданного угла изгиба при действии усилия (рис.9.10);

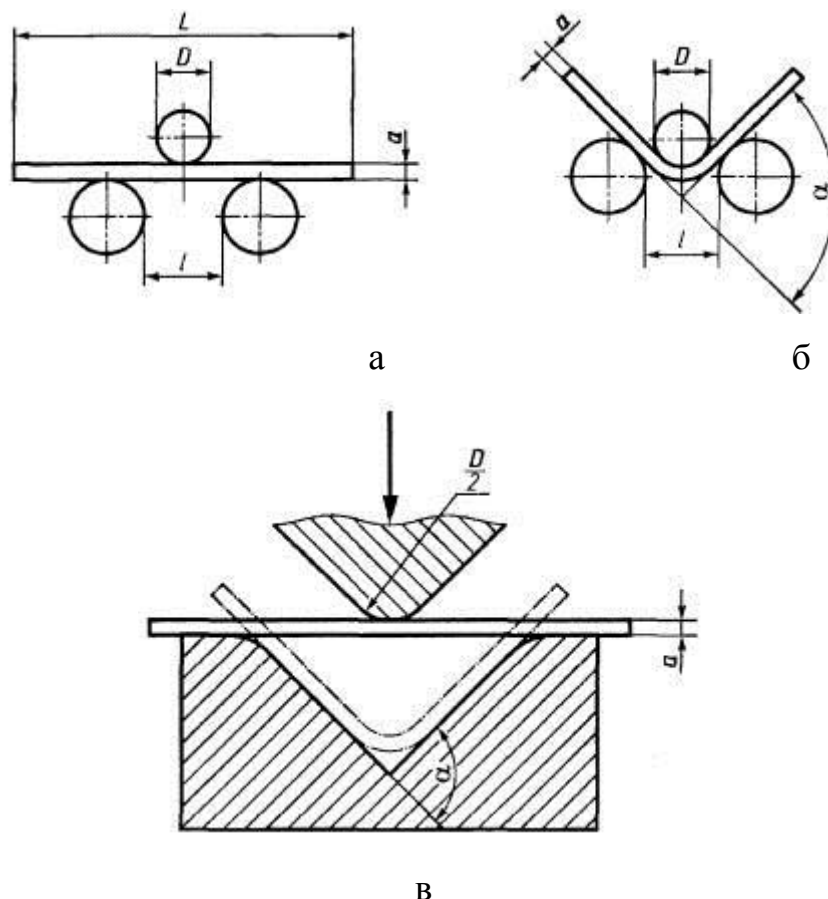


Рисунок 9.10 – Схема технологического испытания на изгиб: а - установка образца; б, в - загиб до определенного угла; a - толщина или диаметр образца (или диаметр вписанной окружности для образцов многоугольного сечения); b - ширина образца; L - длина образца; l - расстояние между опорами изгибающего устройства; D - диаметр оправки; α - угол изгиба; r - внутренний радиус изогнутой части образца после испытания.

- до достижения параллельности сторон образца, отстоящих друг от друга на заданном расстоянии при действии усилия (рис. 9.11);

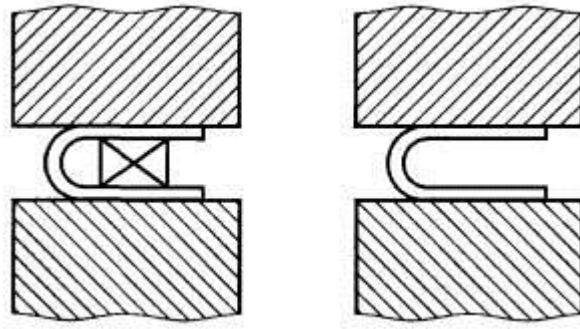


Рис. 9.11 – Испытания до достижения параллельности сторон образца.
- до соприкосновения сторон образца при действии усилия (рис. 9.12).

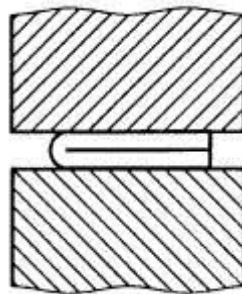


Рис. 9.12 – Испытания до соприкосновения сторон образца.

Изгибающее усилие должно прилагаться постепенно, чтобы обеспечить свободное пластическое течение металла. Отсутствие трещин, видимых невооруженным глазом, служит доказательством того, что образец выдержал испытание на изгиб.

Заключение

Структура (как и ее разновидность – субструктура) определяет главные характеристики механического поведения любого материала (рис. 10.1).

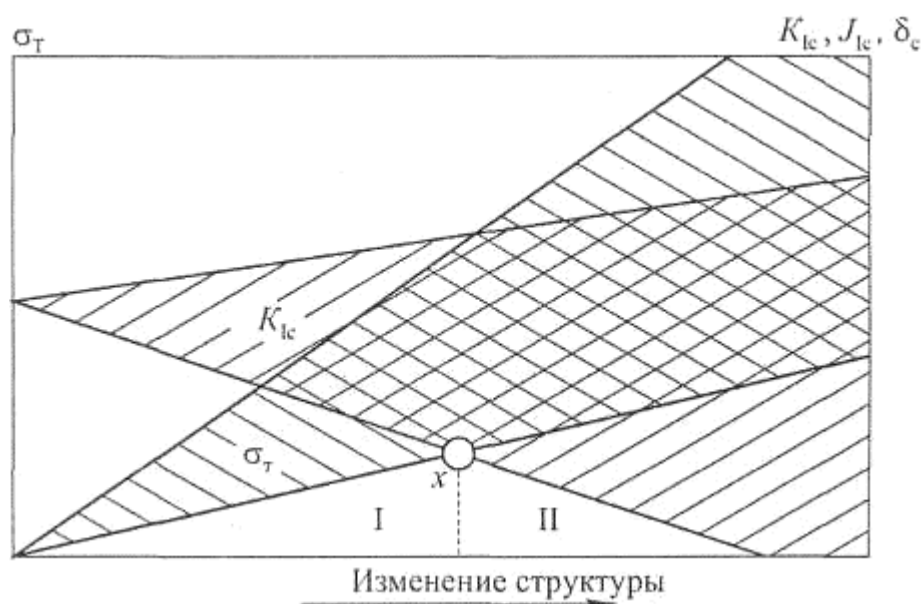


Рис. 10.1. Зависимость главных характеристик механических свойств материала от его структуры: σ_T – предел текучести; σ_{-1} – предел выносливости; K_{IC} – критическое значение коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины; δ_c – деформационный критерий трещиностойкости; J_{IC} – энергетический критерий трещиностойкости; dl/dN – скорость распространения усталостной трещины; $N_{ж}$ – живучесть материала (число циклов нагружения образца до разрушения); K_n – износостойкость материала.

Прочность, которая, в конечном счете, определяет металлоемкость машины или конструкции, выражается многими показателями, из которых важнейшим является предел текучести σ_T . Эта характеристика явно структурночувствительна. Надежность изделия определяется показателями трещиностойкости или сопротивлением структуры материала развитию хрупких трещин (силовым критерием – K_{IC} ; деформационным критерием – d_c и энергетическим критерием – J_{IC}).

Долговечность деталей машин определяется пределом выносливости (σ_{-1}), скоростью распространения трещины (dl/dN) и числом циклов нагружения до разрушения детали – живучестью ($N_{ж}$). При контактных

нагружениях важной характеристикой долговечности является износостойкость ($K_{и}$). Зависимости этих важнейших показателей механических свойств от структуры материала имеют сложный характер, они уточняются в процессе дальнейших исследований (см. Рис.10.1).

Вопросы повышения конструктивной прочности материала для конструкций, деталей машин и механизмов приобретают все большее значение. Решение этих вопросов позволяет уменьшить расход материалов, увеличить срок службы изделий, повысить надежность и долговечность продукции.

В настоящее время новые материалы разрабатываются с использованием двух различных технологических подходов. Наибольшее распространение получил подход, связанный с модернизацией и изменением свойств уже известных материалов, которые широко используются в различных отраслях промышленности. Такой подход хоть и является менее научно интересным и привлекательным, как правило требует меньших материальных затрат и превалирует в современном материаловедении.

Второе направление заключается в проектировании и изготовлении ранее неизвестных материалов с совершенно оригинальными свойствами. Оно более трудоемко, требует значительно больших финансовых затрат, высокой квалификации исследователей и не гарантирует положительный результат. Однако именно этот подход позволяет обеспечить «технологический прорыв» в различных отраслях промышленности и достичь революционных изменений в свойствах конструкционных материалов. Основой для второго направления служат последние достижения в различных областях науки, например в физической химии, а так же современные методы компьютерного моделирования структурных превращений и прогнозирования свойств материалов. Диаграмма конструктивной прочности современных материалов представлена на рис.10.2.

Исследования показали, что наиболее сильные изменения структуры и механических свойств металлов и сплавов создаются при комбинированном воздействии, в частности, термообработкой и пластической деформацией. В настоящее время известно много методов повышения конструктивной прочности, основанных на одновременном воздействии этих факторов, начиная от старых (патентирование) и кончая сравнительно новыми – регулируемым термопластическое упрочнением (РТПУ), вариантами комбинированного упрочнения и специальными видами сварки и наплавки. Таким образом, данные о структуре материала, определяемой различными физическими методами контроля, совершенно необходимы не только для понимания всех сложных фазовых превращений, но и для совершенствования известных и разработки новых технологий упрочнения материалов.

3. Тушинский Л.И. Структурная теория конструктивной прочности материалов. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. - 400 с.
4. Dobrzański L. A. Significance of materials science for the future development of societies / L. A. Dobrzański // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 175. – No. 1–3. – P. 133–148

Список основных стандартов на испытания материалов

К гл.1

К гл. 2

ГОСТ 9.302-88. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля
ГОСТ 7076-99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме

ГОСТ 9391-80. Сплавы твердые спеченные. Методы определения пористости и микроструктуры

ГОСТ 11573-98. Изделия огнеупорные. Метод определения коэффициента газопроницаемости

ГОСТ 12119.0-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Общие требования

ГОСТ 12119.1-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Методы измерения магнитной индукции и коэрцитивной силы в аппарате Эпштейна и на кольцевых образцах в постоянном магнитном поле

ГОСТ 12119.2-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения магнитной индукции в пермеамetre

ГОСТ 12119.3-98 Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения коэрцитивной силы в

разомкнутой магнитной цепи

ГОСТ 12119.4-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения удельных магнитных потерь и действующего значения напряженности магнитного поля

ГОСТ 12119.5-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения амплитуд магнитной индукции и напряженности магнитного поля

ГОСТ 12119.6-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения относительной магнитной проницаемости и удельных магнитных потерь мостом переменного тока

ГОСТ 12119.7-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения удельного электрического сопротивления мостом постоянного тока

ГОСТ 12119.8-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения коэффициента сопротивления изоляционного покрытия

ГОСТ12635-67.Материалы магнитомягкие высокочастотные. Методы испытаний в диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц

ГОСТ12636-67. Материалы магнитомягкие высокочастотные. Методы испытаний в диапазоне частот от 1 до 200 МГц

ГОСТ12637-67. Материалы магнитомягкие высокочастотные. Методы испытаний в диапазоне частот от 200 до 2000 МГц

ГОСТ13610-79. Железо карбонильное радиотехническое. Технические условия

ГОСТ 17809-72. Материалы магнитотвердые литые. Марки

ГОСТ 18898-89.Покрытия металлические. Обзор испытаний на пористость

ГОСТ 19693-74. Материалы магнитные. Термины и определения

ГОСТ 21559-76. Материалы магнитотвердые спеченные. Марки

ГОСТ 22023-76. Материалы строительные. Метод микроскопического количественного анализа структуры

ГОСТ 22524-77. Пикнометры стеклянные. Технические условия

ГОСТ 24063-80. Ферриты магнитотвердые. Марки и основные параметры

ГОСТ24897-81. Материалы магнитотвердые деформируемые. Марки

ГОСТ 24936-89. Магниты постоянные для электротехнических изделий. Общие технические требования

ГОСТ 26849-86. Материалы порошковые. Метод определения величины пор

ГОСТ52956-2008. Материалы магнитотвердые спеченные на основе сплава неодим-железо-бор. Классификация. Основные параметры

К гл.3

ГОСТ 25.001-78.Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Комплекс нормативно-технической и руководящей документации. Общие положения

ГОСТ 25.002-80. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения

ГОСТ 25.503-97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие

ГОСТ 25.601-80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах

ГОСТ 25.602-80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах

ГОСТ 25.603-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на растяжение кольцевых образцов при нормальной, повышенной и пониженной температурах

ГОСТ 25.604-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной и пониженной температурах

ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение

ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу

ГОСТ 3565-80. Металлы. Метод испытания на кручение

ГОСТ 7564-97. Прокат. Общие правила отбора проб, заготовок и образцов для механических и технологических испытаний

ГОСТ 9012-59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю

ГОСТ 9013-59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу

ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников

ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах

ГОСТ 9651-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах

ГОСТ 10006-80. Трубы металлические. Метод испытаний на растяжение

ГОСТ 10446-80. Проволока стальная. Метод испытания на растяжение

ГОСТ 11150-84. Металлы. Методы испытания на растяжение при пониженных температурах

ГОСТ 11262-80. Пластмассы. Метод испытания на растяжение

ГОСТ 11701-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент

ГОСТ 14019-2003. Материалы металлические Метод испытания на изгиб

ГОСТ 14359-69. Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования

ГОСТ 25095-82. Сплавы твердые спеченные. Метод определения модуля упругости (модуля Юнга)

ГОСТ 28840-90. Машины для испытания материалов на растяжение сжатие и изгиб

К гл. 4

ГОСТ 23.201-78. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов и покрытий на газоабразивное изнашивание с помощью центробежного ускорителя.

ГОСТ 23.206-79. Обеспечение износостойкости изделий. Измерение износа трущихся сопряжений по гашению сцинтилляций в смазочном масле

ГОСТ 23.207-79. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний машиностроительных материалов на ударно-абразивное изнашивание.

ГОСТ 23.208-79. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы.

ГОСТ 23.209-79. Обеспечение износостойкости изделий. Измерение износа деталей машин методом поверхностной активности

ГОСТ 23.211-80. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии.

ГОСТ 23.219-84. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний на износостойкость материалов и деталей при гидроэрозионном изнашивании дисперсными частицами

ГОСТ 23.224-86. Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей

ГОСТ 23.301-78. Обеспечение износостойкости изделий. Приборы для измерения износа методом вырезанных лунок. Технические требования.

ГОСТ 17534-72. Надежность изделий машиностроения. Метод измерения износа по глубине вырезанных лунок

ГОСТ 27640-88. Материалы конструкционные и смазочные. Методы экспериментальной оценки коэффициента трения.

ГОСТ 27674-88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения.

ГОСТ 27860-88. Детали трущихся сопряжений. Методы измерения износа.

К гл.5

ГОСТ 25.501-78. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении.
Методы испытаний на контактную усталость

ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость

ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости

ГОСТ 25.505-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытаний на малоцикловую усталость при термомеханическом нагружении

ГОСТ 25.507-85. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытания на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Общие требования

ГОСТ 19533-74. Надежность изделий машиностроения. Ускоренная оценка пределов выносливости методом ступенчатого нагружения (Локати)

ГОСТ 23207-78. Сопротивление усталости основные термины, определения и обозначения

ГОСТ 24217-80. Машины для испытания металлов на усталость. Типы. Основные параметры

ГОСТ 25859-83. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках

ГОСТ 28841-90. Машины для испытания материалов на усталость. Общие технические требования

К гл.6.

ГОСТ 25.506-85 .Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении

К гл.7

ГОСТ 3248-81. Металлы. Метод испытания на ползучесть

ГОСТ 10145-81 Металлы. Метод испытания на длительную прочность

ГОСТ 26007-83. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Методы испытания на релаксацию напряжений

К гл. 8

ГОСТ 9.005-72. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, металлические и неметаллические неорганические покрытия. Допустимые и недопустимые контакты с металлами и неметаллами

ГОСТ 9.031-74. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия анодно-окисные полуфабрикатов из алюминия и его сплавов. Общие требования и методы контроля

ГОСТ 9.073-77. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Виды, ряды толщ и обозначения

ГОСТ 9.102-78 . Единая система защиты от коррозии и старения. Воздействие биологических факторов на технические объекты. Термины и определения

ГОСТ 9.103-78. Единая система защиты от коррозии и старения.
Временная противокоррозионная защита металлов и изделий. Термины и определения

ГОСТ 9.301-86. Единая система защиты от коррозии и старения.
Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования

ГОСТ 9.302-88. Единая система защиты от коррозии и старения.
Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля

ГОСТ 9.307-89. Единая система защиты от коррозии и старения.
Покрытия цинковые горячие. Общие требования и методы контроля

ГОСТ 9.311-87. Единая система защиты от коррозии и старения.
Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Метод оценки коррозионных поражений

ГОСТ 9.312-89. Единая система защиты от коррозии и старения.
Покрытия защитные. Методы определения жаростойкости

ГОСТ 9.506-87. Единая система защиты от коррозии и старения.
Ингибиторы коррозии металлов в водно-нефтяных средах. Методы определения защитной способности

ГОСТ 9.510-93. Единая система защиты от коррозии и старения.
Полуфабрикаты из алюминия и алюминиевых сплавов. Общие требования к временной противокоррозионной защите, упаковке, транспортированию и хранению

ГОСТ 9.706-81. Единая система защиты от коррозии и старения.
Материалы полимерные. Методы испытаний на стойкость к радиационному старению

ГОСТ 9.708-83. Единая система защиты от коррозии и старения. Пластмассы. Методы испытаний на старение при воздействии естественных и искусственных климатических факторов

ГОСТ 9.903-81. Единая система защиты от коррозии и старения. Стали и сплавы высокопрочные. Методы ускоренных испытаний на коррозионное растрескивание

ГОСТ 9.904-82. Единая система защиты от коррозии и старения. Сплавы алюминиевые. Метод ускоренных испытаний на расслаивающую коррозию

ГОСТ 9.909-86. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы испытаний на климатических испытательных станциях

ГОСТ 9.911-89 Единая система защиты от коррозии и старения. Сталь атмосферостойкая. Метод ускоренных коррозионных испытаний

ГОСТ 6130-71. Металлы. Методы определения жаростойкости

ГОСТ 6992-68. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод испытаний на стойкость в атмосферных условиях

К гл.9

ГОСТ 8817-82 Металлы. Метод испытания на осадку

ГОСТ 8695-75 Трубы. Метод испытания на сплющивание

ГОСТ 8694-75 Трубы. Метод испытания на раздачу

ГОСТ 8693-80 Трубы металлические. Метод испытания на бортование

ГОСТ 3728-78 Трубы. Метод испытания на загиб

ГОСТ 10447-93 Проволока. Метод испытания на навивание Г

ГОСТ 1579-93 Проволока. Метод испытания на перегиб

ГОСТ 1545-80 Проволока. Метод испытания на скручивание

ГОСТ 13813-68 Металлы. Метод испытания на перегиб листов и лент толщиной менее 4 мм

ГОСТ 10510-80. Металлы. Метод испытания на выдавливание листов и лент по Эриксену

