

МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Л.Г. ПЕТРОВА, О.В. ЧУДИНА, А.В. ОСТРОУХ

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ.
ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И
РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ**

Методическое пособие
к мультимедийному учебному изданию

МОСКВА 2007

УДК 669.01
ББК 34.2

Петрова Л.Г., Чудина О.В., Остроух А.В. Механические свойства металлов. Пластическая деформация и рекристаллизация: Методическое пособие к мультимедийному учебному изданию / МАДИ(ГТУ). – М., 2007. – 47 с.

Методическое пособие предназначено для углубленного изучения разделов «Механические свойства металлов» и «Пластическая деформация и рекристаллизация» по дисциплине «Материаловедение» студентами технических специальностей. Издание состоит из настоящего методического пособия в текстовом варианте и мультимедийных материалов в электронном виде на компакт-диске. Предлагаемый комплект учебных материалов может быть использован как для самостоятельной подготовки студентов, так и для работы в аудитории под руководством преподавателя. Текстовый вариант учебного пособия содержит методические рекомендации по работе с мультимедийными учебными материалами, основные сведения из лекционного курса по данным разделам, а также варианты тестовых заданий для контроля. Электронный вариант содержит мультимедийные презентации лекционных материалов с соответствующими ссылками на текстовые фрагменты, практические упражнения и тестовые задания для контроля и самоконтроля усвоения материала.

Пособие разработано совместно преподавателями кафедр «Металловедения и термообработки» и «Автоматизированные системы управления» и представляет собой первую часть инновационного учебно-методического комплекта по материаловедению. В разработке мультимедийных материалов принимал участие студент Казаков А. С. в рамках дипломного проектирования по кафедре АСУ.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе в учебном процессе все более актуальной становится задача использования возможностей информационных технологий для расширения спектра методических средств и создания учебных материалов нового поколения. Мультимедиа технологии являются перспективными и популярными направлениями информатики и все шире применяются в учебном процессе. Они имеют целью создание компьютерного продукта, содержащего коллекции изображений, текстов и данных, сопровождающихся звуком, видео, анимацией и другими визуальными эффектами, включающего интерактивный интерфейс и другие механизмы управления.

Мультимедийные обучающие материалы становятся неотъемлемой частью методического и информационного обеспечения образовательного процесса. Их применение при изучении технических дисциплин помогает разгрузить преподавателя и учащихся, высвободить дополнительное время на разбор сложных или специфических моментов дисциплины, позволяет внести творческий элемент в изучение предмета.

Насущная необходимость разработки и внедрения качественных мультимедийных учебных материалов обусловлена как потребностями студентов, так и преподавателей. С одной стороны, применение таких материалов повышает эффективность самостоятельной работы студентов, их интерес к изучению дисциплины, а следовательно, уровень усвоения материала. С другой стороны, использование мультимедийных средств решает задачу повышения качества аудиторной работы преподавателя со студентами и, прежде всего, за счет наиболее наглядной визуализации лекционных материалов.

В методическом пособии представлена совместная разработка кафедр «Металловедение и термообработка» и

«Автоматизированные системы управления» МАДИ (ГТУ) инновационного учебно-методического комплекта (ИУМК) по разделам дисциплины «Материаловедение».

Разработка мультимедийного учебного комплекта по «Материаловедению» базируется на принципе модульного построения курса, на который опирается как текстовый, так и электронный вариант учебника. Текстовый вариант представляет собой традиционный курс лекций по материаловедению, разбитый на несколько разделов – модулей. В электронном варианте каждый модуль включает структурированный материал лекции, мультимедийные презентационные материалы, тестовые задания для контроля и самоконтроля знаний. Отдельные модули разбиваются на подразделы, некоторые из них включают в себя виртуальные лабораторные работы.

В настоящем пособии представлены учебные материалы по двум модулям курса - «Механические свойства металлов» и «Пластическая деформация и рекристаллизация». В состав ИУМК входят мультимедийные учебные материалы на электронном носителе (DVD) и настоящее текстовое пособие, включающее методические рекомендации по использованию ИУМК, основные теоретические сведения по соответствующим разделам дисциплины и варианты контрольных тестовых заданий.

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МУЛЬТИМЕДИЙНЫХ УЧЕБНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Общие сведения о мультимедийных учебных материалах

Мультимедиа продукты построены на следующих принципах:

- Представление информации с помощью комбинации множества воспринимаемых человеком сред (multi – много, media – среда).

- Наличие нескольких сюжетных линий в содержании продукта (в том числе и выстраиваемых самим пользователем на основе «свободного поиска» в рамках предложенной в содержании продукта информации).
- Художественный дизайн интерфейса и средств навигации.
Мультимедийные учебные материалы включают три основных компонента:

1. Мультимедийные лекционные материалы.
2. Виртуальные лабораторные работы.
3. Тестовые задания для контроля и самоконтроля.

Мультимедийные лекционные материалы содержат описание изучаемых в данной теме объектов в виде набора фрагментов, содержащих мультимедиа-компоненты, такие как статическая графика, флэш-анимация, 3D-анимация, видеофрагменты.

Наглядная визуализация лекционных материалов является крайне важной при изучении дисциплины «Материаловедение», что связано со специфическими особенностями этого курса. Материаловедение как наука изучает металлические и неметаллические материалы, применяемые в технике, а также объективные закономерности взаимосвязи свойств материалов с их химическим составом, структурой, способами обработки и условиями эксплуатации. Многие объекты, изучаемые в материаловедении, например, микроструктуры металлов и сплавов, движение дислокаций в кристалле и т.п. можно представить в компьютерном виде: в виде слайдов, анимации, видеоизображений.

Мультимедийные презентации лекционного материала с применением средств визуализации являются наиболее целесообразными при изучении объектов и процессов следующего характера:

- объектов, процессов и явлений, которые недоступны непосредственным наблюдениям;

- процессов и явлений, характерной особенностью которых является движение и развитие;
- очень медленно или очень быстро протекающих процессов и явлений;
- микро- и макрообъектов.

Для содержания курса «Материаловедение» характерны все виды перечисленных объектов и явлений. Например, перемещение дислокации в кристалле – это процесс движения микрообъекта, недоступный непосредственному наблюдению, происходящий с очень высокой скоростью. Другой пример - процесс кристаллизации микроскопических зародышей металла из жидкой фазы, который чрезвычайно трудно пронаблюдать в реальных условиях. Именно такие объекты требуют специальной разработки видео- или анимационных способов представления.

Мультимедийные презентации лекционного материала, выполненные в виде последовательных фрагментов (слайдов), включают в себя как статические объекты, т.е. все обязательные понятия, определения, формулировки по данной теме, визуализируемые на экране монитора, так и динамические объекты. Например, в мультимедийной версии модуля «Пластическая деформация и рекристаллизация» (рис. 1) представлены в виде анимации процессы, происходящие в металлическом образце при упругой и пластической деформации, механизмы скольжения и двойникования в монокристалле, динамики постепенного изменения строения металла при пластическом деформировании и т. п. В некоторых фрагментах использованы элементы интерактива. Так, фрагмент «Рекристаллизация» предусматривает возможность для пользователя управлять виртуальным процессом нагрева металла путем перемещения мыши по шкале термометра и наблюдать при этом за изменениями структуры и свойств нагретого металла.

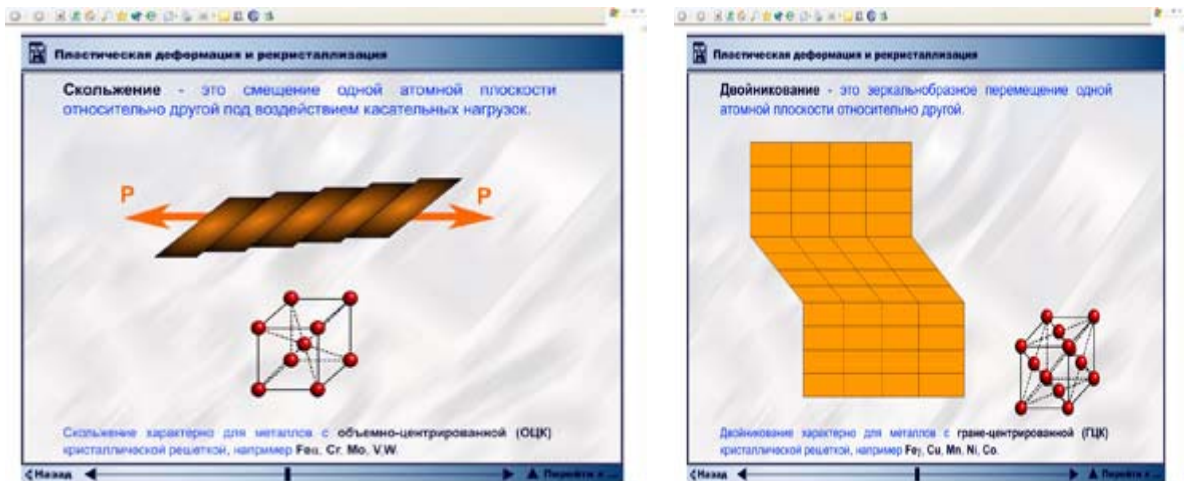


Рис. 1. Пример мультимедийной презентации лекционного материала по пластической деформации

Визуальный ряд, использованный для каждого модуля, логически разбит на отдельные слайды, последовательность которых совпадает с порядком изложения материала в процессе лекции. Поэтому преподаватель может использовать мультимедийные материалы, в том числе, как презентационные для визуального сопровождения лекции. Кроме того, эти мультимедийные материалы могут быть использованы студентом и для самостоятельной работы, так как представленные на слайдах понятия и определения содержат гиперссылки на соответствующие текстовые фрагменты.

В качестве визуальных средств в мультимедийных учебных материалах использованы иллюстрации, реальные видео- и фотоматериалы, материалы, созданные с помощью средств компьютерной анимации, 2D- и 3D-моделирования и т.п. Наилучшее восприятие преподаваемой информации и наиболее наглядное представление графиков, диаграмм, схем достигается с помощью различных графических средств. При разработке учебных материалов учитывали необходимость достижения

информационной насыщенности, эмоционального воздействия на пользователя, оптимального темпа предъявления информации с экрана, управления процессом восприятия, целостности и законченности каждого фрагмента.

Для наиболее эффективного использования визуальных средств при их разработке руководствовались следующими основными правилами:


- четкое и продуманное дозирование информации, не допускающее перегруженности используемого средства;
- отсутствие многотемности;
- создание проблемной ситуации;
- простое композиционное построение кадра с четким выделением главного;
- разумное использование дикторского текста, который должен быть предельно лаконичным, выразительным, доступным, не подменяющим изображение, содержать паузы для того, чтобы не мешать восприятию зрительного ряда;
- возможность использования субтитров вместо дикторского текста;
- занимательность зрительного материала путем использования разнообразных способов и приемов съемки, средств анимации и компьютерного моделирования;
- показ изучаемого объекта или явления во всех возможных вариантах.

Виртуальные лабораторные работы в мультимедийном варианте (рис. 2) представляют собой компьютерные модели лабораторно-практических занятий, проводимых в реальных учебных условиях. Лабораторные работы проводятся, главным образом, под руководством преподавателя, однако, могут быть использованы студентами и для самостоятельных практических занятий. В наиболее сложных и ответственных шагах лабораторных работ предусмотрены подсказки.

8. Изучите дополнительно
8.2. Определение марки стали

6. Размеры образцов стали

Подщелкните мышкой все стандартные образцы стали.
Для справки используйте таблицу размеров стандартных образцов.



$l_0 = 100$ мм
 $d_0 = 20$ мм
 $l_0 = 100$ мм
 $d_0 = 10$ мм
 $l_0 = 200$ мм
 $d_0 = 20$ мм
 $l_0 = 220$ мм
 $d_0 = 20$ мм
 $l_0 = 200$ мм
 $d_0 = 15$ мм
 $l_0 = 50$ мм
 $d_0 = 10$ мм

Образец	Длина рабочей части l_0 , мм		Площадь поперечного сечения рабочей части S_0 , мм ²	Диаметр рабочей части круглого образца d_0 , мм
	Длинный	Короткий		
Нормальный	200	100	314	20
Пропорциональный	$11,3 \sqrt{S_0}$	$5,65 \sqrt{S_0}$	Произвольный	Произвольный

Подсказка

Рис. 2. Фрагмент лабораторной работы по определению марки стали на основании испытаний механических свойств

Компьютерные симуляции не могут полностью заменить реальные практические работы, которые проводит студент на лабораторном оборудовании, с использованием термических печей, приборов измерения твердости, металлографических микроскопов и т.д. Но вместе с тем, не всегда реализуется возможность задействовать для лабораторных работ соответствующее оборудование, например, громоздкие установки для механических испытаний. В таких случаях проведение виртуальных лабораторных работ является единственным способом познакомить студентов с практическим аспектом раздела курса.

Тестовые задания для контроля знаний студентов формируются для каждого раздела курса и предусматривают

возможность как самопроверки знаний студентом, так и оценки усвоения раздела преподавателем как формы анализа текущей успеваемости. Самоконтроль (рис. 3) предполагает выполнение набора тестовых заданий с целью самоподготовки обучаемого. Задания для самоконтроля выполняются любое количество раз. Выполнение возможно до полностью правильного решения. Результаты выполнения не заносятся в журнал успеваемости.

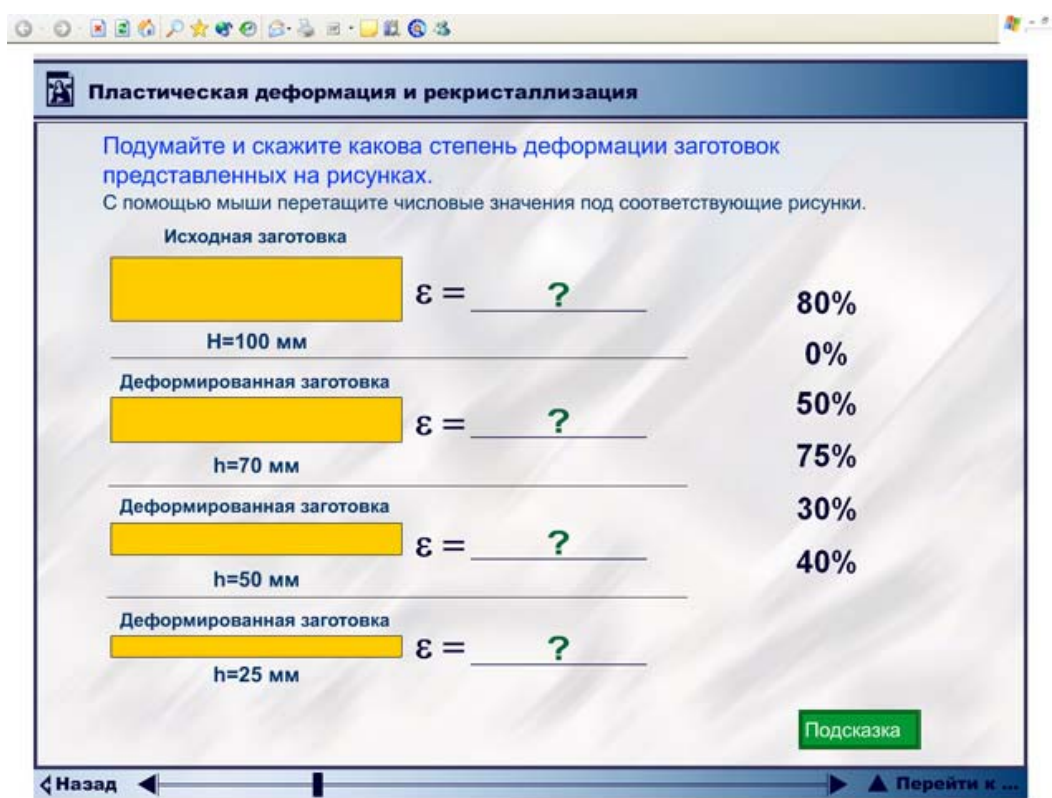


Рис. 3. Пример задания для самоконтроля

Контроль предполагает выполнение набора тестовых заданий с целью контрольной проверки знаний обучаемого преподавателем. В отличие от самоконтроля в каждом тестовом задании учитываются правильные и неправильные ответы, а результаты заносятся в журнал успеваемости.

1.2. Порядок работы с мультимедийным учебным изданием

Вставьте компакт-диск в привод. Через несколько секунд мультимедийное учебное издание (МУИ) запустится автоматически и откроется начальная заставка, показанная на рис. 4.



Рис. 4. Начальная заставка МУИ

Внизу слева находится кнопка **[Запуск]**. Для начала работ с МУИ щелкните по ней левой клавишей мыши. Если МУИ автоматически не запустилось, то, вероятно, у Вас отключена возможность автоматического запуска с компакт-диска. В этом

случае Вы можете запустить МУИ вручную, открыв содержимое компакт-диска и запустив программу StartMnu.exe.

Далее открывается главное окно МУИ, показанное на рис. 5. Вверху окна расположен заголовок и аннотация к МУИ. Ниже, примерно посередине - наименования лекций.

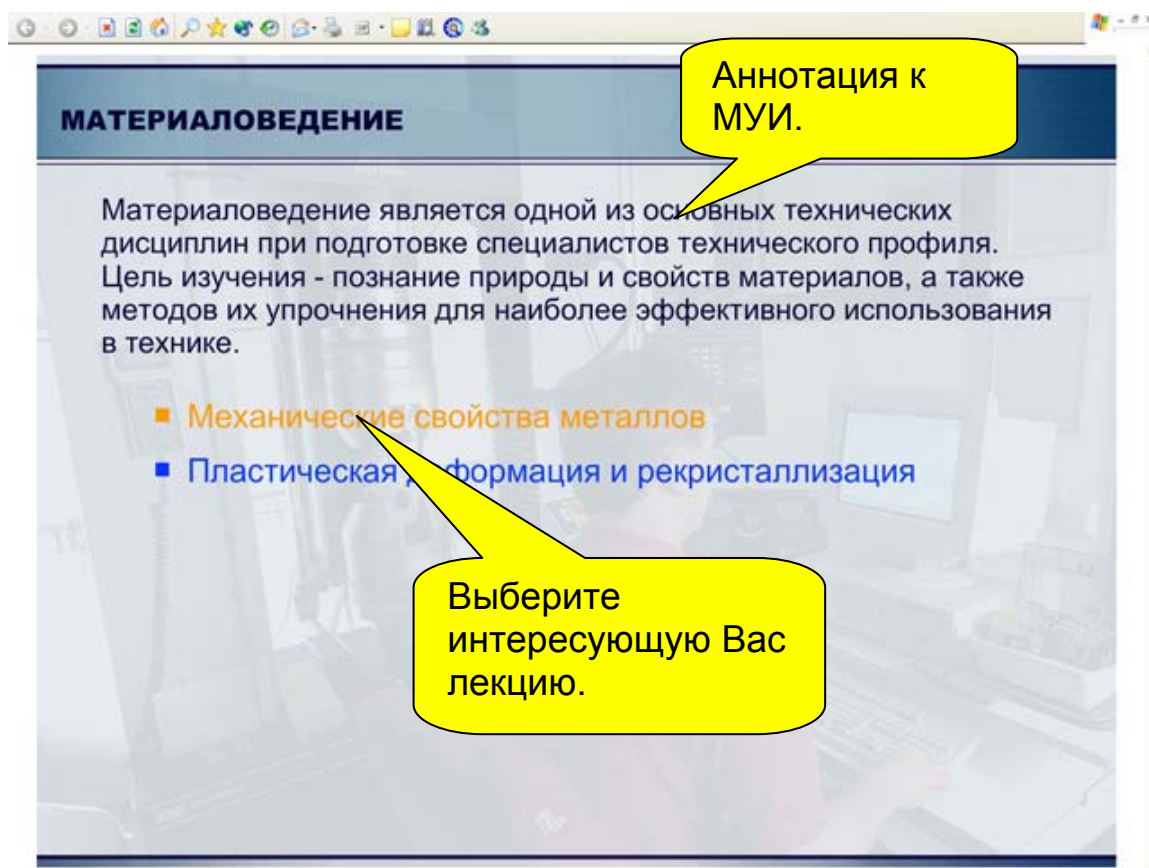


Рис. 5. Главное окно МУИ

Выберите интересующую Вас лекцию. Для этого щелкните по ее названию левой клавишей мыши. Откроется окно, как показано на рис. 6. Вверху окна расположен заголовок лекции. Центральную часть занимает мультимедийное содержание лекции. Внизу находится панель навигации:

- кнопка **[Назад]** – для возврата в главное меню;

- кнопка **[Перейти к...]** – для раскрытия списка фрагментов лекции;
- кнопка **[Текст лекции]** – для показа текста лекции, с возможностью распечатки;
- кнопки **[стрелка вперед]** и **[стрелка назад]** - для перехода к следующему и предыдущему фрагменту лекции.

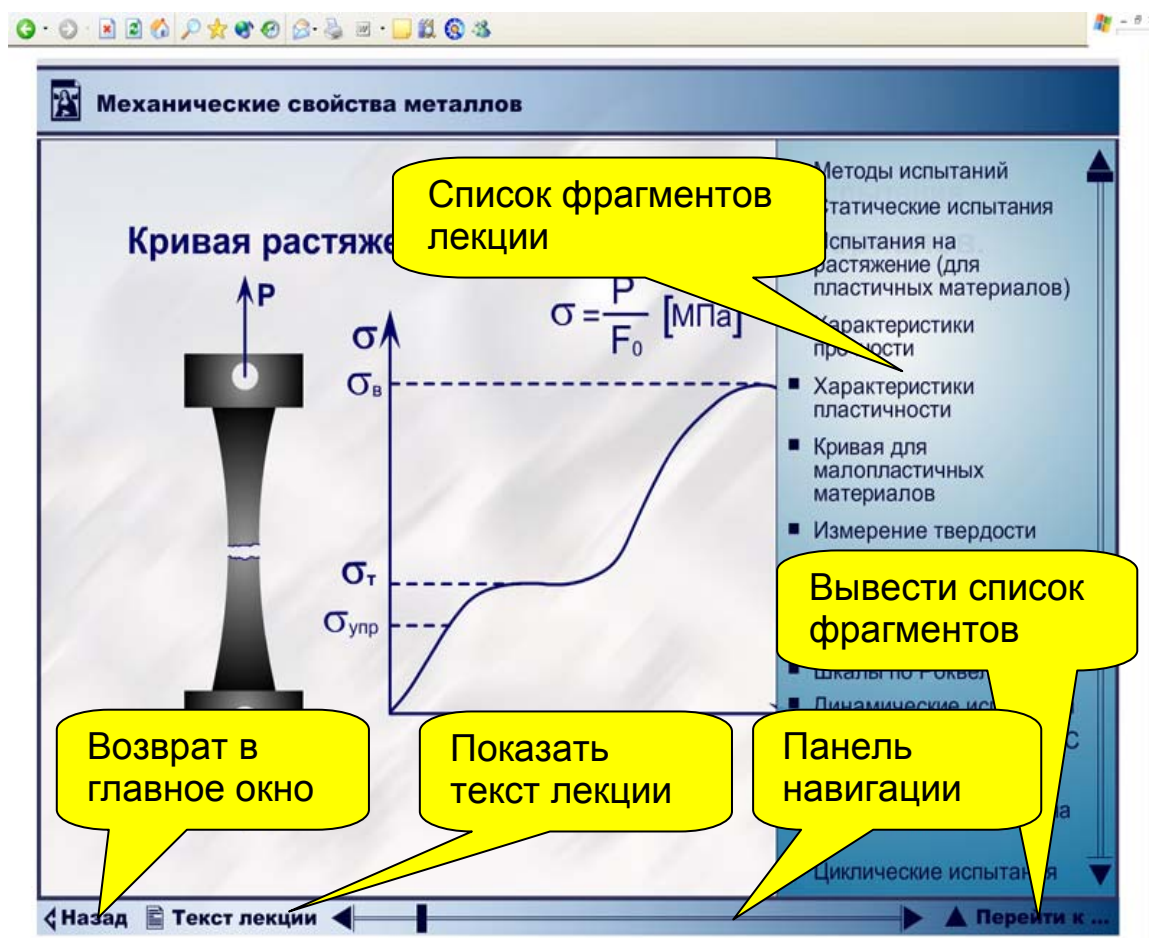


Рис. 6. Главное окно МУИ

Ползунок в нижней части экрана показывает, какая часть лекции пройдена.

2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

Механические свойства определяют поведение материала под действием приложенных внешних нагрузок. Механические свойства характеризуют сопротивление металла деформации (характеристики прочности) или разрушению (характеристики пластичности, вязкости). Эти характеристики необходимы для выбора материалов и режимов их термической обработки, расчетов на прочность конструкций, контроля их состояния в процессе эксплуатации. Среди характеристик механических свойств различают:

- характеристики конструкционной прочности, т.е. критерии надежности и долговечности материалов (вязкость разрушения, сопротивление усталости, коррозии, износостойкость и т.д.);
- критерии, определяемые независимо от конструктивных особенностей и характера службы изделий, определяемые при стандартных испытаниях.

Характеристики, которые определяют в лабораторных условиях на образцах методами стандартных испытаний, составляют основную группу характеристик механических свойств. В зависимости от скорости изменения нагрузки во времени испытания подразделяются на *статические, динамические и циклические*.

2.1. Характеристики механических свойств, определяемые при статических испытаниях

Статические испытания предусматривают медленное и плавное увеличение нагрузки на образец. По способу приложения и характеру действия различают *растягивающие, сжимающие, изгибающие, крутящие, срезающие* или *сгибающие*

статические нагрузки. К статическим испытаниям относится также определение *твёрдости*.

2.1.1. Испытания на растяжение

Испытания на растяжения (ГОСТ 1497-84) проводят на специальных машинах с использованием стандартных образцов (рис. 7).

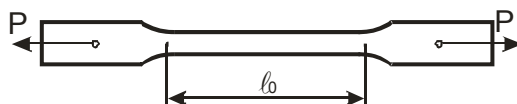


Рис. 7. Стандартный образец для испытаний на растяжение

В процессе испытаний по мере увеличения растягивающей нагрузки образец доводится до разрушения и записывается диаграмма растяжения в координатах «нагрузка – удлинение образца». При стандартных размерах образца диаграмма приводится к диаграмме условных напряжений в координатах «напряжение σ – относительное удлинение δ » (рис. 8). При этом напряжения σ , возникающие в материале в результате структурно-фазовых превращений, определяется путем деления соответствующей нагрузки P на начальную площадь поперечного сечения образца F_0 :

$$\sigma = \frac{P}{F_0} \text{ [МПа]}. \quad (1)$$

Напряжения σ называют условными, в отличие от истинных напряжений, которые учитывают изменение площади поперечного сечения образца при растяжении. На диаграмме растяжения можно выделить несколько участков (рис. 8, а):

- участок упругой деформации (О-А), т.е. участок, на котором сохраняется закон Гука линейной зависимости напряжения и

удлинения образца. Тангенс угла наклона этого участка характеризует *модуль упругости* $E = \sigma/\delta = \operatorname{tg} \alpha$,

- участок пластической деформации (A-B);
- участок местной пластической деформации (B-C), которому соответствует образование необратимых изменений образца - шейки и окончательного разрушения образца (точка C).

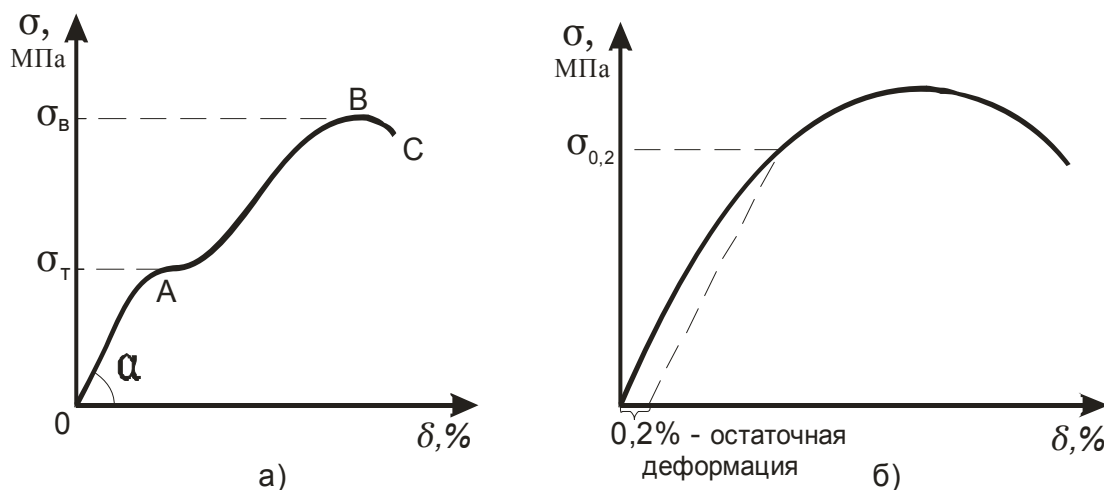


Рис. 8. Диаграммы растяжения пластичного (а) и малопластичного (б) материалов

При испытаниях на растяжение определяют две группы характеристик – *характеристики прочности* и *характеристики пластичности*.

Характеристики прочности материалов

1. *Предел пропорциональности $\sigma_{мп}$* – максимальное напряжение, соответствующее линейному (упругому) участку кривой растяжения. Предел пропорциональности часто отождествляют с пределом упругости.
2. *Предел упругости* это максимальное напряжение, вызывающее только упругие деформации, т.е. напряжение, при котором остаточная деформация практически равна нулю. Чаще всего определяют *условный предел упругости* при очень

малых значениях остаточных деформаций: 0,005, 0,02 или 0,05%. Соответствующие обозначения предела упругости – $\sigma_{0,005}$, $\sigma_{0,02}$ и $\sigma_{0,05}$.

3. *Предел текучести σ_T* - это напряжение, при котором материал деформируется (течет) без заметного увеличения нагрузки. Для пластичных материалов это напряжение соответствует *площадке текучести* на диаграмме растяжения (рис. 8, а). Для малопластичных материалов, не имеющих площадки текучести, используется *условный предел текучести $\sigma_{0,2}$* .

Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ - это напряжение, вызывающее остаточную пластическую деформацию 0,2% от первоначальной длины образца (рис. 8, б). Предел текучести характеризует сопротивление материала малым деформациям.

4. *Предел прочности или временное сопротивление σ_B* – напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, которая предшествует разрушению образца: $\sigma_B = P_{max} / F_0$.

Характеристики пластичности материалов

1. *Относительное удлинение* - это отношение удлинения образца к его первоначальной длине под действием растягивающей нагрузки:

$$\delta = \frac{(l_K - l_0)}{l_0} 100\%, \quad (2)$$

где l_0 и l_K – начальная и конечная длины образца.

2. *Относительное сужение* – это отношение уменьшения площади поперечного сечения образца в месте разрыва к начальной площади поперечного сечения под действием растягивающей нагрузки:

$$\psi = \frac{(F_0 - F_K)}{F_0} 100\%, \quad (3)$$

где F_0 и F_k – соответственно, начальная и конечная площади поперечного сечения.

2.1.2. Методы определения твердости

Твердость – свойство материала сопротивляться пластической деформации при вдавливании в его поверхность твердого тела – *индентора*. Измерение твердости дает возможность без разрушения изделия получить информацию о механических свойствах и широко применяется для контроля качества металлических материалов.

Измерение твердости по Бринеллю

В этом методе (ГОСТ 9012-59) в поверхность образца вдавливается под нагрузкой стальной закаленный шарик диаметром $D=2,5; 5$ или 10 мм. В зависимости от вида испытуемого материала величина нагрузки может меняться от 250 до 3000 кгс (~ от 2500 до 30000 Н). После снятия нагрузки на поверхности остается отпечаток в виде лунки диаметром d (рис. 9).

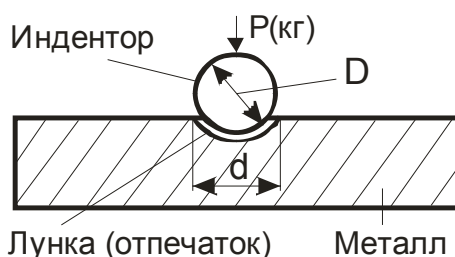


Рис. 9. Схема определения твердости по Бринеллю

Твердость по Бринеллю обозначается **HB** (от английского *hardness* - твердость и первой буквы фамилии автора метода) и определяется, как отношение нагрузки (P , кгс) к площади поверхности сферического отпечатка (S_{omn} , мм²): $HB=P/S_{omn}$. Обычно по измеренному значению диаметра отпечатка твердость

HB определяют по таблицам. Число твердости по Бринеллю записывают без указания единиц измерения, например, 185 **HB**.

Способ Бринелля используют только для материалов малой и средней твердости, до 450 **HB**, т.к. при высокой твердости испытуемых образцов стальной шарик может деформироваться.

Существует зависимость между числом твердости по Бринелю и временным сопротивлением материала. Например, для стали $\sigma_B=0,34 \text{ HB}$.

Измерение твердости по Роквеллу

Этот метод измерения твердости (ГОСТ 9013-59) наиболее универсален и наименее трудоемок. В зависимости от предполагаемой твердости и размеров измеряемых зон в качестве сменного индентора может применяться либо алмазный конус с углом при вершине 120° (рис. 10), либо стальной закаленный шарик диаметром 1,5875 мм. Нагрузка на испытуемый образец складывается из предварительной $P_0=100 \text{ Н}$ и основной P_1 . После снятия нагрузки индикатор прибора Роквелла показывает число твердости **HR**, которое пропорционально глубине вдавливания индентора h . Единица твердости по Роквеллу соответствует 0,002 мм осевого перемещения индентора.

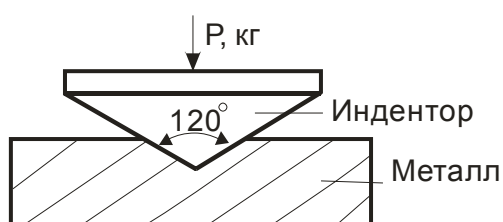


Рис. 10. Схема определения твердости по Роквеллу с использованием алмазного индентора

Твердость по Роквеллу можно измерять по трем шкалам (**A**, **B**, **C**), которые различаются типом индентора и величиной нагрузки (табл. 1).

Таблица 1

Шкалы определения твердости по Роквеллу

Шкала	Индентор	Нагрузка $P=P_0+P_1$, Н	Измеряемые объекты
<i>HRA</i>	Алмазный конус	600	Особо твердые материалы, тонкие листы и слои(0,5-1,0 мм) Пределы измерения твердости 70-85
<i>HRB</i>	Стальной шарик	1000	Мягкие металлы (<450НВ) Пределы измерения твердости 25-100
<i>HRC</i>	Алмазный конус	1500	Твердые материалы (>450НВ) Пределы измерения твердости 20-67

Твердость по Роквеллу является *безразмерной* величиной, она обозначается в единицах твердости с указанием шкалы, например, 50 *HRC*.

Измерение твердости по Виккерсу

В этом методе (ГОСТ 2999-75) в качестве индентора используется четырехгранная алмазная пирамида (рис. 11), которая вдавливается в образец (изделие) под нагрузкой P – от 10 до 1000 Н. После снятия нагрузки измеряют диагонали отпечатка (ромба) d_1 и d_2 и определяют среднее арифметическое

$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$. Твердость рассчитывают по формуле:

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2} \text{ [МПа]}, \quad (4)$$

или определяют по специальным таблицам в зависимости от величины d .

Этим методом измеряют твердость тонких поверхностных слоев, а также материалов с очень высокой твердостью.

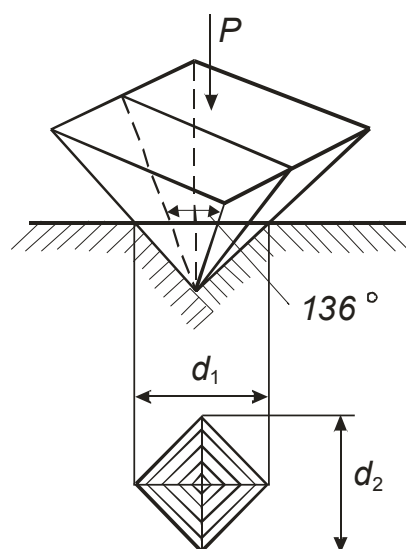


Рис. 11. Схема измерения твердости по Виккерсу

Принцип измерения твердости по Виккерсу используется при определении *микротвердости* (ГОСТ 9450-75). Этот метод используется для определения твердости тонких покрытий и отдельных структурных составляющих сплавов. Прибор определения микротвердости представляет собой металлографический микроскоп, оснащенный механизмом для вдавливания алмазной пирамидки под небольшой нагрузкой (от 0,05 до 5Н). Микротвердость определяют по диагонали отпечатка, как и по методу Виккерса. В обозначении микротвердости указывается величина нагрузки в граммах, например, H_{100} , единицы измерения - МПа.

2.2. Характеристики механических свойств, определяемые при динамических испытаниях

Особенностью *динамических испытаний* является резкое приложение нагрузки к образцу. Динамические испытания на ударный изгиб проводят для определения *ударной вязкости*. Образцы для испытаний имеют надрез, который является

концентратором напряжений. Метод основан на разрушении такого образца ударом маятникового копра (рис. 12).

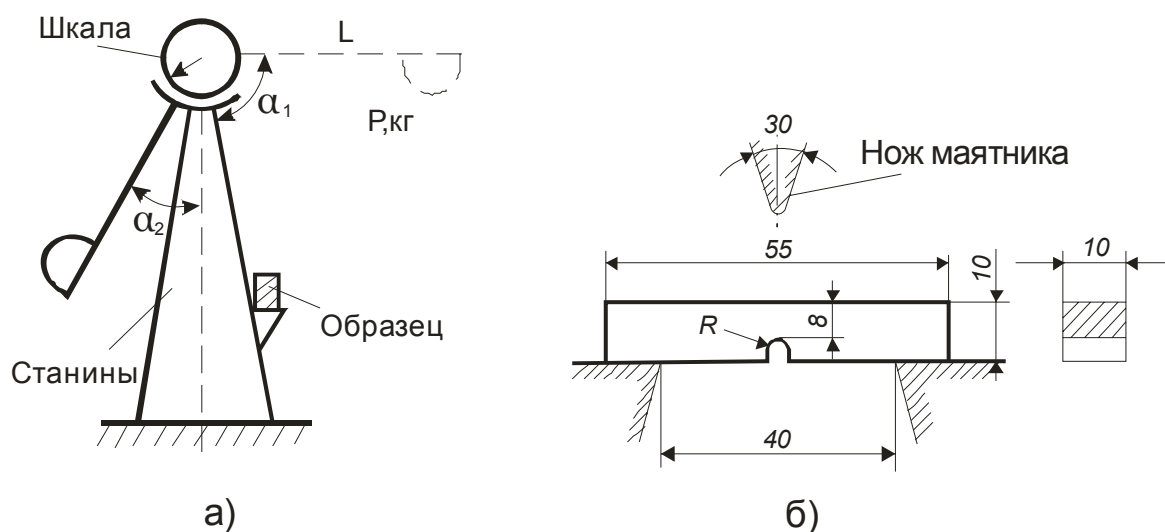


Рис. 12. Схема маятникового копра (а) и образец (б) для испытаний на ударную вязкость

Копер представляет собой две мощные станины, жестко закрепленные на фундаменте. Стандартный образец устанавливают на опоры между станинами, на угол α_1 поднимают маятник со стрелой вылета L и грузом P и отпускают. Удар по образцу приводит к его разрушению, после чего маятник отклоняется на угол α_2 . Определяют работу, затраченную на разрушение образца:

$$A = PL(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2), \text{ [Дж]} \quad (5)$$

Отношение этой работы к площади рабочего поперечного сечения образца называется *ударной вязкостью*:

$$KCU = \frac{A}{F_0} \text{ [Дж/м}^2\text{]}, \quad (6)$$

где F_0 – площадь поперечного сечения образца в месте надреза.

В зависимости от вида надреза ударная вязкость обозначается (ГОСТ 9454-78):

- KCU – при радиусе надреза $r=1$ мм,

- *KCV* – при радиусе надреза $r=0,25$ мм,
- *KCT* – при концентраторе в виде трещины.

Ударная вязкость характеризует склонность металла к хрупкому разрушению, она включает работу зарождения трещины (a_z) и работу распространения трещины (a_p):

$$KC = a_z + a_p \quad (7)$$

Чем больше работа распространения трещины, тем меньше возможность внезапного хрупкого разрушения.

Ударная вязкость зависит от:

- размера зерна металла – измельчение зерна приводит к значительному повышению ударной вязкости;
- наличия концентраторов напряжений в изделии;
- природы материала и особенностей его обработки;
- наличия вредных примесей;
- скорости деформации – чем выше скорость, тем ударная вязкость ниже;
- температуры.

При уменьшении температуры ниже некоторого предельного значения опасность хрупкого разрушения резко возрастает. *Порог хладноломкости* – это температура (интервал температур), при котором происходит переход от вязкого разрушения к хрупкому, сопровождающийся резким снижением ударной вязкости. Нижний (t_n) и верхний (t_v) пределы порога хладноломкости определяют в серии ударных испытаний при разных температурах (рис. 13).

Тип разрушения определяет вид излома металла (рис.14): вязкому разрушению соответствует вязкий излом, имеющий матовое, волокнистое строение, хрупкому разрушению – хрупкий излом с блестящим, кристаллическим строением. При переходе из вязкого состояния в хрупкое меняется вид излома металла: доля волокнистой составляющей в изломе уменьшается, а кристаллической - увеличивается. Поэтому температурный порог хладноломкости можно определить при исследовании изломов: в

качестве порога хладноломкости при этом принимают температуру, соответствующую равным долям волокнистой и кристаллической составляющих в изломе. В этом случае он обозначается t_{50} , что означает 50%-ную долю волокна в изломе.

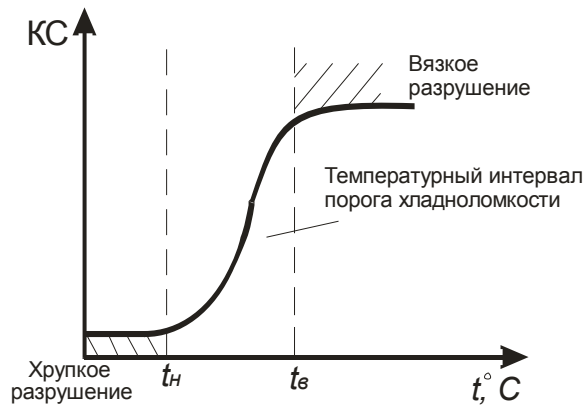
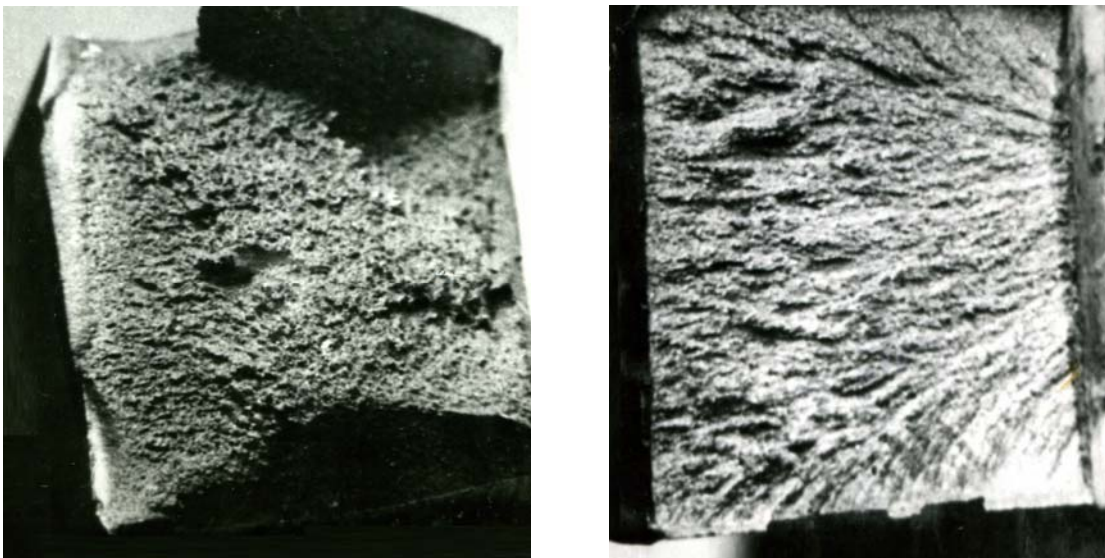


Рис. 13. Зависимость ударной вязкости от температуры и определение порога хладноломкости



а)

б)

Рис. 14. Вязкий (а) и хрупкий (б) изломы металла

Рабочая температура эксплуатации изделия должна быть выше порога хладноломкости материала, который составляет для

большинства сталей $-40\dots-50^{\circ}\text{C}$. Чем выше температурный запас вязкости материала, т.е. разница между порогом хладноломкости и рабочей температурой, тем меньше риск катастрофического разрушения изделия.

2.3. Характеристики механических свойств, определяемые при циклических испытаниях

Большинство разрушений деталей и конструкций при эксплуатации происходит в результате циклического (знакопеременного) нагружения. Разрушение металла под действием знакопеременных нагрузок называют *усталостью*. Усталостному разрушению предшествует процесс постепенного накопления повреждений и образование трещин в материале.

Особенности усталостного разрушения:

- разрушение под действием знакопеременных нагрузок происходит при напряжениях, меньших, чем при статической нагрузке (меньше σ_s и σ_T);
- разрушение начинается с микродеформаций и локального зарождения трещины на поверхности или вблизи от нее в местах максимальной концентрации напряжений и протекает в несколько стадий;
- образуется излом с характерным строением, отражающим последовательность процессов усталости (рис.15).

Свойство материалов противостоять усталости называют *выносливостью*. *Предел выносливости* – это максимальное напряжение, при котором образец не разрушается после бесконечного или заданного числа циклов нагружения. Под циклом напряжений понимают совокупность переменных значений напряжений за один период T (рис. 16).

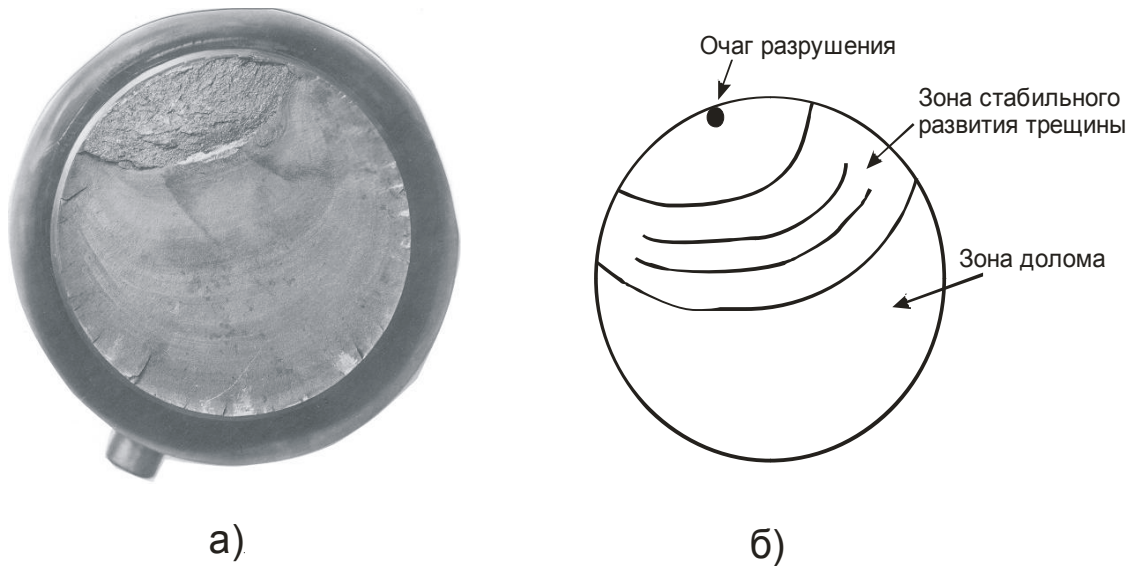


Рис. 15. Усталостный излом: а) - общий вид, б) – схема строения

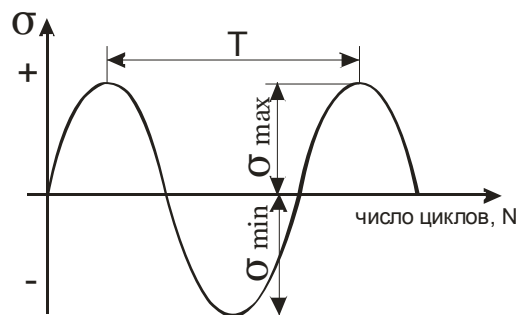


Рис. 16. Схема циклического нагружения

Предел выносливости обозначается σ_R , где $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ – коэффициент асимметрии цикла. При симметричном цикле ($\sigma_{min} = -\sigma_{max}$) $R = -1$, и предел выносливости обозначается σ_{-1} .

Предел выносливости определяют при циклических испытаниях (испытаниях на усталость - ГОСТ 25502-79) (рис. 17). Образец закрепляют в подшипнике, задают знакопеременную нагрузку, соответствующую $\sigma_I = 0,6\sigma_B$, и определяют число циклов до разрушения N_I . Проводят серию таких испытаний при последовательно уменьшающихся нагрузках (соответствующих напряжениям σ_2 , σ_3 , и т.д.) и по полученным данным (N_2 , N_3 и т.д.)

строят кривую усталости $\sigma(N)$. С уменьшением амплитуды напряжения количество циклов до разрушения возрастает, напряжение, которое соответствует бесконечно большому числу циклов (горизонтальный участок кривой усталости), принимают за предел выносливости.

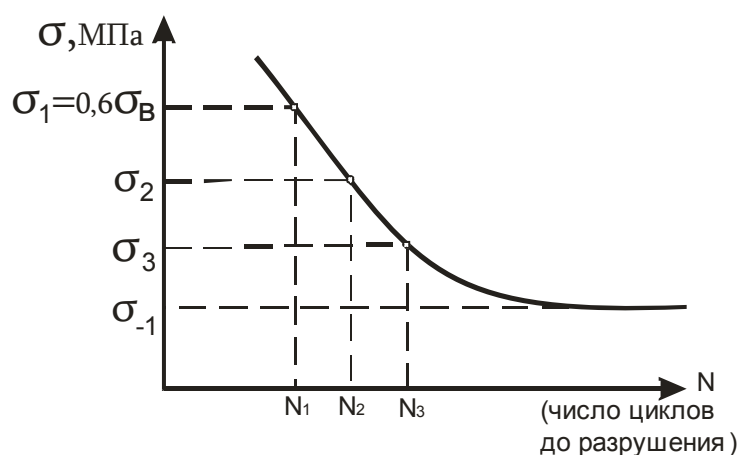


Рис. 17. Построение кривой усталости

Для многих металлов (например, для цветных сплавов) нагрузка плавно снижается при увеличении числа циклов, т.е. кривая усталости не имеет горизонтального участка. В таких случаях определяют ограниченный предел выносливости, соответствующий заданному базовому числу циклов. База циклов для стали должна быть не ниже $N=10^7$, для цветных металлов - $N=10^8$ циклов.

Предел выносливости зависит от:

- размера детали – чем крупнее деталь, тем ниже σ_{-1} ;
- чистоты обработки поверхности и наличия концентраторов напряжений – надрезы, царапины, коррозия резко снижают σ_{-1} ;
- вида термической обработки материала.

Для повышения предела выносливости детали подвергают поверхностной обработке: закалке ТВЧ, химико-термической обработке, поверхностной пластической деформации. При этом

создаются дополнительные остаточные сжимающие напряжения в поверхностном слое, которые затрудняют зарождение и распространение трещин.

3. ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

3.1. Пластическая деформация металлов

Деформацией называется изменение размеров и формы тела под воздействием приложенной нагрузки. Сила, приложенная к телу, обычно не перпендикулярна к нему, а направлена под некоторым углом, поэтому в теле возникают *нормальные и касательные напряжения*. Нормальные напряжения подразделяют на растягивающие (положительные) и сжимающие (отрицательные).

3.1.1. Упругая и пластическая деформация

Упругой деформацией называют деформацию, которая исчезает после прекращения действия внешних сил. Упругая деформация не вызывает заметных изменений в структуре и свойствах металла, так как под действием приложенной нагрузки происходит только незначительное смещение атомов из положения равновесия. После снятия нагрузки смещенные атомы возвращаются в исходное равновесное состояние и кристаллы приобретают свою исходную первоначальную форму и размеры.

При возрастании касательных напряжений выше определенной величины деформация становится необратимой. После снятия нагрузки устраняется лишь упругая составляющая, а остаточные деформации не исчезают. Т.е. *пластическая деформация* - это деформация, которая сопровождается изменением формы и размеров образца. При этом изменяется структура металла, а следовательно, и его свойства.

Пластическая деформация лежит в основе многих технологических способов обработки металлов давлением: прокатки,ковки,штамповки,прессования и т.д.

3.1.2. Механизмы пластической деформации

Основными механизмами пластической деформации являются:

- скольжение;
- двойникование;
- межзеренное перемещение.

Первые два характерны для деформации монокристалла, т.е. происходят в пределах одного зерна. Межзеренное перемещение происходит при деформации поликристаллического материала.

Скольжение под действием касательных напряжений приводит к сдвигу атомных плоскостей друг относительно друга (рис. 18, а). Скольжение в кристаллической решетке протекает по плоскостям с наиболее плотной упаковкой атомов в направлениях с минимальными межатомными расстояниями, где сопротивление сдвигу наименьшее.

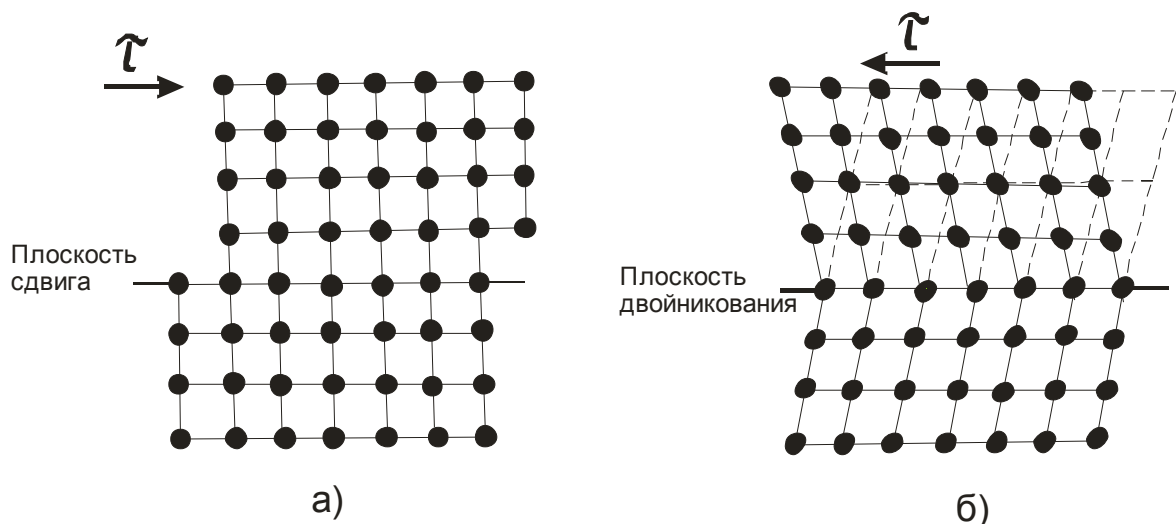


Рис.18. Схема деформации металла под действием напряжения сдвига τ : а) – скольжение, б) - двойникование

Плоскости легкого скольжения различаются в металлах с разным типом кристаллической решетки. Скольжение в металлах

с кубическими решетками происходит во многих направлениях, поэтому такие металлы легко деформируются и обладают более высокой пластичностью, чем металлы с гексагональной решеткой.

Процесс скольжения не следует представлять как одновременное смещение одной части кристалла относительно другой, так как такой сдвиг потребовал бы огромных напряжений на синхронный разрыв межатомных связей. Механизм скольжения связан с движением дислокаций в кристаллической решетке. Перемещение дислокации в плоскости скольжения через весь кристалл приводит к смещению (сдвигу) соответствующей части кристалла на одно межплоскостное расстояние, при этом на поверхности кристалла образуется ступенька (рис. 19).

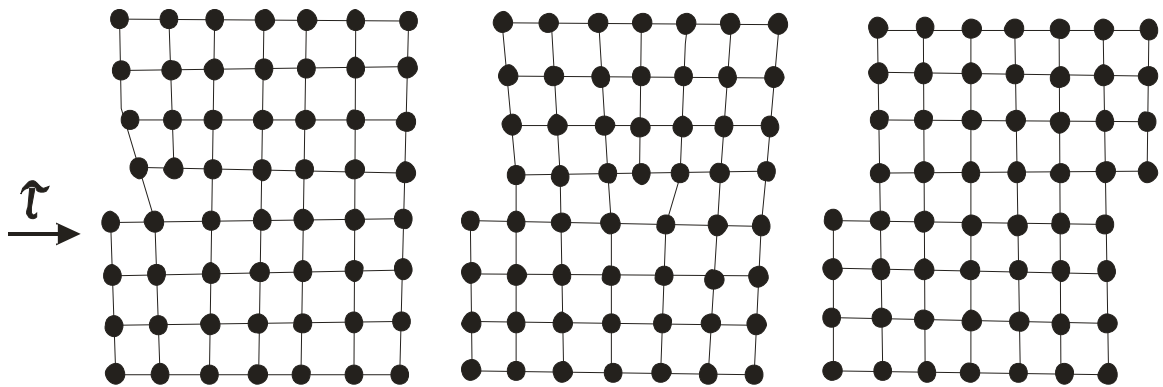


Рис. 19. Схема сдвига в кристалле в результате перемещения дислокаций

Двойникование осуществляется путем переориентации одной части кристалла зеркально симметрично относительно другой (рис. 18, б). Симметричные части кристалла оказываются разделенными плоскостью двойникования. Двойникование, как и скольжение, сопровождается прохождением дислокаций сквозь кристалл.

Механизм двойникования характерен, главным образом, для металлов, с плотноупакованными решетками К12 и Г12. В

металлах с ОЦК-решеткой двойникование наблюдается только при больших степенях деформации и низких температурах.

При деформации поликристаллического материала, кроме рассмотренных механизмов скольжения и двойникования, происходит *межзеренное перемещение*, которое приводит к изменению формы зерен. Механизм переориентировки зерен можно представить в такой последовательности. В начале под действием приложенных сил начинается сдвиговая пластическая деформация в зернах, плоскости скольжения которых близки по направлению вектору максимальных касательных напряжений, а также по плоскостям, плотность дислокаций в которых максимальна. Затем последовательно в процесс включаются плоскости, в которых сопротивление сдвигу более высокое. Одновременно происходит смещение и поворот соседних зерен, т.е. переориентация их в пространстве по отношению к действующим силам.

Зерна, переориентированные в положения, благоприятные для деформирования, включаются в этот процесс, вызывая поворот других, соседних с ними зерен, и т.д. В результате в металле, подвергнутом значительной пластической деформации, формируется волокнистая структура с зернами, вытянутыми в направлении приложенных сил (рис. 20).

При больших деформациях в зернах возникает преимущественная ориентировка кристаллографических плоскостей относительно внешних деформационных сил, которая получила название *текстуры деформации*. Образование текстуры сопровождается появлением *анизотропии* механических и физических свойств, т.е. свойства поликристалла в различных направлениях окажутся неодинаковыми.

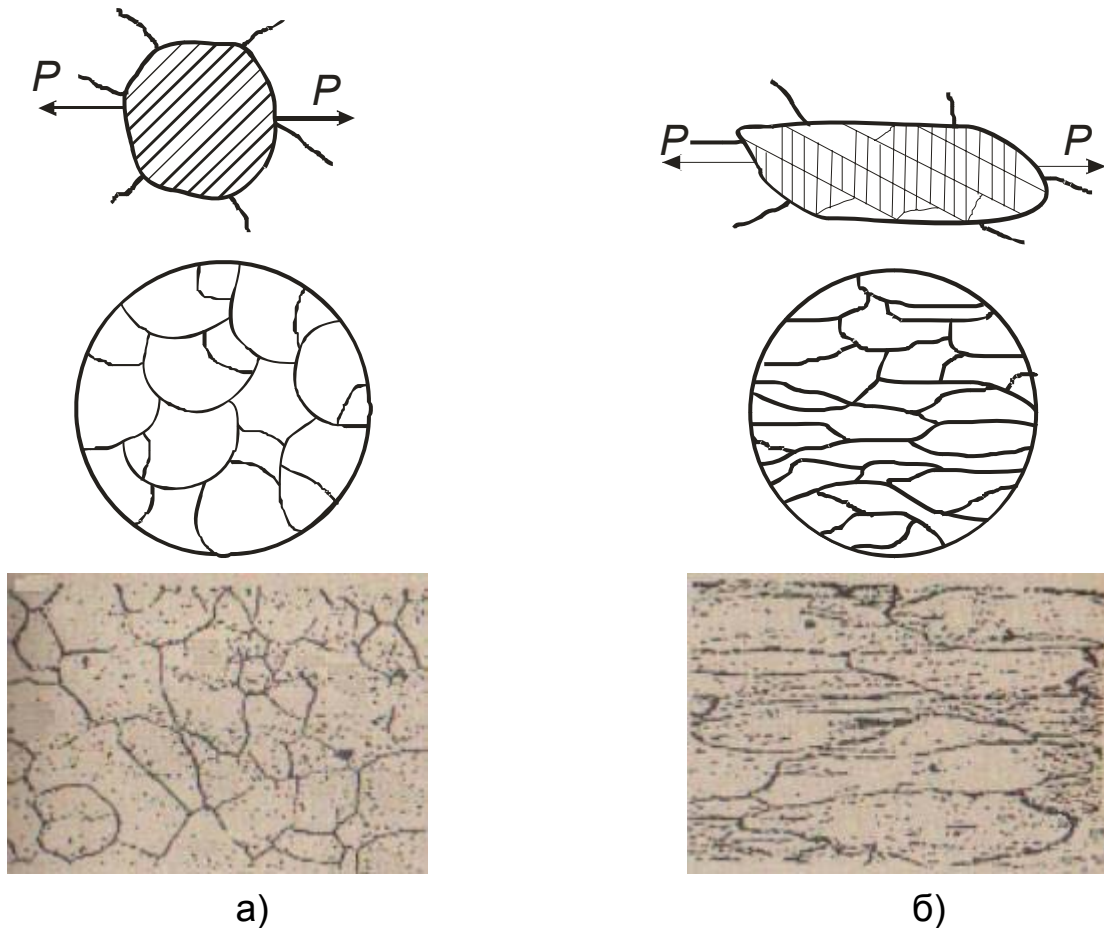


Рис. 20. Изменение формы зерен в металле под действием пластической деформации: а) – до деформации, б) – после деформации

3.1.3. Влияние пластической деформации на свойства металлов

Величину деформации определяют *степенью пластической деформации* ε (рис. 21):

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где h_0 и h – размер образца до и после деформации соответственно.

С увеличением степени пластической деформации свойства, характеризующие сопротивление деформации (прочность, твердость) повышаются, а способность к пластической

деформации (пластичность, ударная вязкость) уменьшаются (рис. 22). Упрочнение металла при пластической деформации называется *наклепом* или *нагартовкой*.

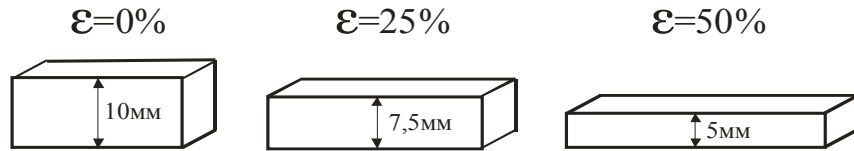


Рис. 21. Образцы с различной степенью пластической деформации

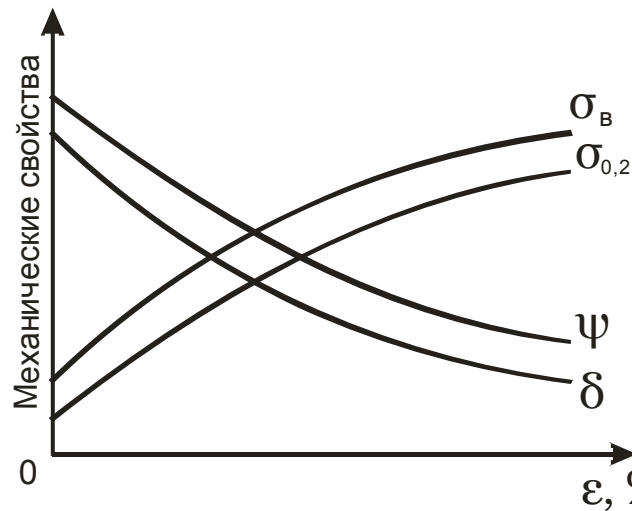


Рис. 22. Влияние степени пластической деформации на механические свойства металла

Упрочнение металла в процессе пластической деформации вызвано:

- увеличением плотности дефектов кристаллического строения (вакансий, межузельных атомов);
- увеличением плотности дислокаций до $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$;
- искажением кристаллической решетки;
- дроблением зерен.

Уровень деформационного упрочнения зависит от кристаллического строения металла: металлы с ГЦК-решеткой упрочняются сильнее, чем металлы с ОЦК-решеткой.

3.2. Влияние нагрева на структуру и свойства деформированного металла

Состояние наклепанного металла является неравновесным, и, в связи с этим, термодинамически неустойчиво. При нагреве деформированного металла происходит его переход в более стабильное состояние, так как при повышении температуры ускоряется перемещение точечных дефектов, создаются условия для перераспределения дислокаций и уменьшения их количества.

Процессы, происходящие при нагреве, проходят последовательно несколько стадий, их подразделяют на *возврат* и *рекристаллизацию*. Температурные интервалы этих процессов индивидуальны для каждого металла и определяются в зависимости от температуры плавления $T_{пл}$.

3.2.1. Возврат

При нагреве до $T=(0,2...0,3)T_{пл}$ начинается процесс *возврата*, который заключается в повышении структурного совершенства наклепанного металла без заметных изменений структуры и свойств.

Первая стадия возврата - *отдых металла*. При нагреве до температуры $0,2T_{пл}$ активизируются диффузионные процессы. В связи с этим происходит уменьшение числа точечных дефектов за счет их поглощения дислокациями и стока к границам зерен, а также частичное снятие внутренних напряжений.

Вторая стадия возврата – *полигонизация*, т.е. фрагментация зерен на полигоны (субзерна) с малоугловыми границами. Процесс полигонизации имеет дислокационный механизм. В

результате деформации металла дислокации в зерне оказываются расположенными неупорядоченно (рис. 23, а). При нагреве до температуры $(0,25...0,3)T_{пл}$ дислокации становятся подвижными: взаимодействуя, дислокации различных знаков аннигилируют, а избыточные дислокации одного знака выстраиваются в стенки, образуя границы субзерен (рис. 23, б).

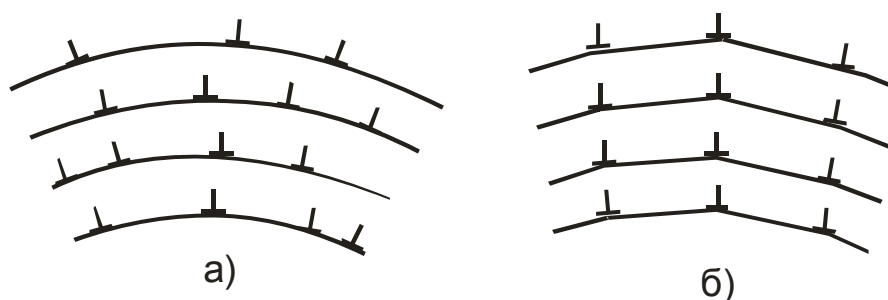


Рис. 23. Схема процесса полигонизации, а) – распределение дислокаций после деформации, б) – распределение дислокаций после полигонизации и образование субзерен

3.2.2. Рекристаллизация

Температура начала рекристаллизации

При дальнейшем повышении температуры диффузионная подвижность атомов возрастает, что приводит к изменениям в микроструктуре – зарождению новых равноосных зерен. Образование новой структуры из равноосных зерен взамен вытянутых зерен деформированного металла называется *рекристаллизацией*. Температура, при которой появляются первые равноосные зерна, называется *температурой начала рекристаллизации* (рис. 24). При этой температуре отмечается начало изменения механических свойств: прочность и твердость металла уменьшаются, а характеристики пластичности повышаются.

Температура начала рекристаллизации конкретного металла или сплава зависит от его температуры плавления:

$$T_{н.р.} = \alpha T_{пл}, \quad (9)$$

где α - коэффициент, зависящий от состава сплава и степени его чистоты.

Для технически чистых металлов $\alpha=0,4$, для сплавов со структурой твердых растворов $\alpha=0,5...0,6$. Уменьшение количества примесей в металле понижает коэффициент α до $0,1...0,2$, а наличие большого количества легирующих элементов увеличивает значение α до $0,7...0,8$.

Температура начала рекристаллизации тем выше, чем меньше степень пластической деформации, меньше длительность нагрева и чем больше величина зерна до деформации.

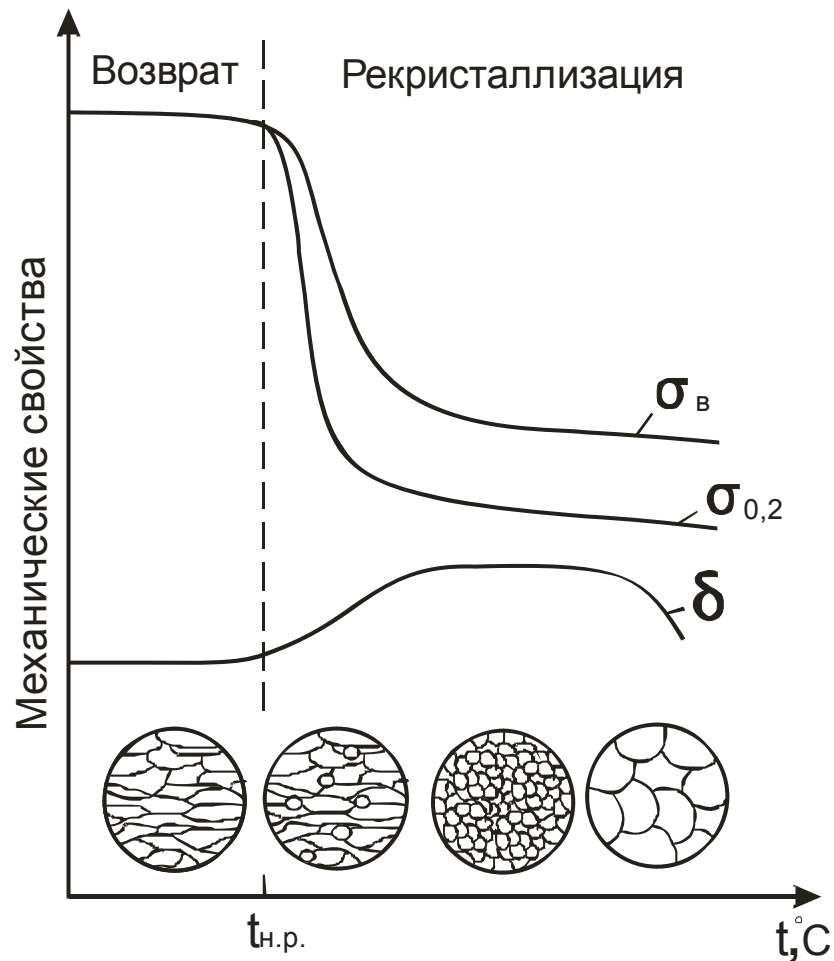


Рис. 24. Изменение структуры и свойств деформационно-упрочненного металла при нагреве

Изменение структуры и свойств металла при рекристаллизации

При нагреве выше температуры начала рекристаллизации происходят структурные изменения, соответствующие стадиям рекристаллизации.

Первичная рекристаллизация начинается с образования мелких равноосных зерен при $T_{н.р.}$. При повышении температуры количество новых зерен увеличивается, а их размер практически не меняется, так как скорость зарождения зерен выше скорости их роста. Первичная рекристаллизация заканчивается полной заменой волокнистой структуры деформированного металла новыми равноосными зернами. Такие изменения в структуре сопровождаются снижением прочности и повышением пластичности металла (рис. 24).

Собирательная рекристаллизация – это процесс роста рекристаллизованных зерен при дальнейшем нагреве (рис. 24). Этот процесс происходит путем поглощения мелких зерен более крупными. Движущая сила этого процесса – стремление к снижению энергии границ зерен путем уменьшения их протяженности. В результате собирательной рекристаллизации наклеп практически полностью снимается: характеристики прочности снижаются, а показатели пластичности возрастают, приближаясь к исходным значениям до пластической деформации. Разупрочнение объясняется снятием искажений кристаллической решетки и уменьшением плотности дислокаций (до $10^6 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$).

Вторичная рекристаллизация может происходить, если какие-либо из новых зерен имеют предпочтительные условия для роста. В результате в структуре наблюдается разнотернистость – наряду с множеством мелких зерен образуется небольшое количество очень крупных зерен. Такая структура неблагоприятно влияет на механические свойства металла.

Уровень механических свойств рекристаллизованного металла зависит от размера его зерна. Чем мельче зерно, тем

большей прочностью и пластичностью обладает металл. При слишком высоких температурах нагрева происходит сильный рост зерна (перегрев), что сопровождается уменьшением характеристик пластичности (рис. 24).

Влияние различных факторов на размер рекристаллизованного зерна

При нагреве деформированного металла не происходит восстановления «старых» зерен, которые существовали в структуре металла до деформации, а появляется совершенно новое зерно, размер которого может существенно отличаться от исходного. Размер рекристаллизованного зерна зависит от:

- температуры рекристаллизации;
- продолжительности рекристаллизационного отжига;
- степени предварительной пластической деформации.

При данной степени пластической деформации повышение температуры и увеличение продолжительности рекристаллизационного отжига приводит к увеличению размера зерна (рис. 25, а,б).

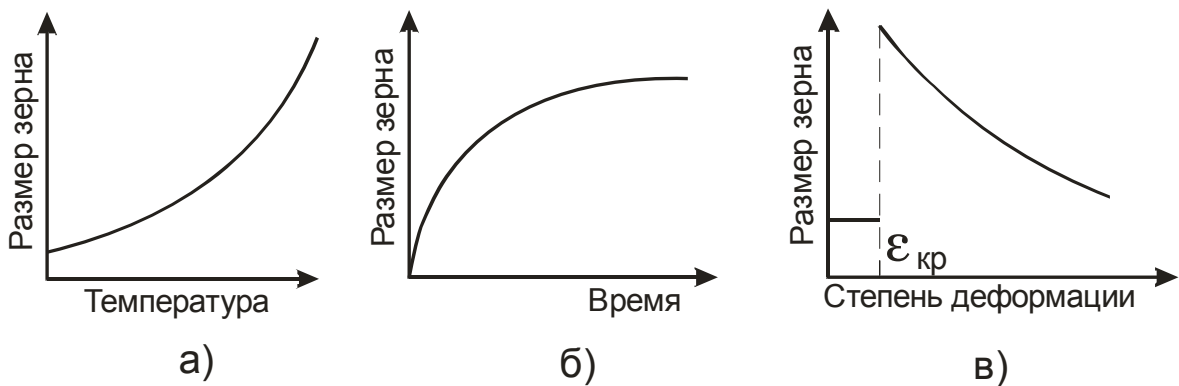


Рис. 25. Влияние температуры (а), продолжительности отжига (б) и степени деформации (в) на размер рекристаллизованного зерна

Величина рекристаллизованного зерна тем меньше, чем больше степень пластической деформации (рис. 25, в). При очень малых степенях деформации нагрев не вызывает

рекристаллизации. Минимальная степень деформации, выше которой при нагреве возможны рекристаллизационные процессы, называется *критической*, ее величина составляет 3...15%. При степени пластической деформации чуть выше критической величина зерна после рекристаллизации резко возрастает и может во много раз превосходить величину исходного зерна. Критическая степень деформации тем меньше, чем выше температура рекристаллизационного отжига.

Горячая и холодная деформация

Горячая и холодная деформация различаются в зависимости от соотношения температуры деформации и температуры начала рекристаллизации.

Холодная деформация – это деформация, которая проводится при температуре ниже температуры начала рекристаллизации ($t_{деф} < t_{н.р.}$). Холодная деформация сопровождается наклепом металла.

Горячая деформация – это деформация, которая проводится при температуре выше температуры начала рекристаллизации ($t_{деф} > t_{н.р.}$). При горячей обработке давлением упрочнение в процессе деформации непрерывно чередуется с рекристаллизационными процессами разупрочнения при температуре обработки или при охлаждении. В результате формируется полностью рекристаллизованная структура.

4. ВАРИАНТЫ ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ

В данном разделе представлены некоторые варианты тестовых заданий для контроля усвоения материала студентами преподавателем. Для самоконтроля студенты могут использовать задания в мультимедийном варианте учебного пособия, содержащиеся на компакт-диске.

Вариант 1

- 1. Максимальное напряжение, предшествующее разрушению – это:**
 - предел текучести;
 - предел прочности;
 - предел выносливости.

- 2. Твердость по Бринеллю обозначается:**
 - HB,
 - HV,
 - HRC

- 3. К характеристикам пластичности относится:**
 - предел прочности;
 - твердость по Роквеллу;
 - относительное удлинение.

- 4. Каково относительное удлинение образца, если до испытаний его длина – 50 мм, а после – 65 мм?**
 - 15%;
 - 30%;
 - 23%.

- 5. При испытаниях на твердость по Виккерсу в качестве индентора используется:**
 - стальной шарик;
 - алмазная пирамида;
 - алмазный конус.

- 6. При хрупком разрушении наблюдается следующее соотношение работы зарождения и разрушения трещины:**
 - работа зарождения трещины существенно больше работы распространения трещины;
 - работа зарождения трещины примерно равна работе распространения трещины;
 - работа зарождения трещины существенно меньше работы распространения трещины.

- 7. Наклеп металла сопровождается:**
 - одновременным увеличением прочности и пластичности;
 - увеличением прочности при понижении пластичности;
 - уменьшением прочности при повышении пластичности.

- 8. На стадии собирательной рекристаллизации происходит:**
 - зарождение новых зерен;
 - укрупнение зерна;
 - уменьшение размера зерна.

Вариант 2

- 1. Напряжение, соответствующее остаточной деформации 0,2% - это:**
 - условный предел текучести;
 - физический предел текучести;
 - предел пропорциональности.

- 2. Чему равен предел прочности образца с площадью поперечного сечения 10 мм², если его разрушение произошло при нагрузке 2000 Н?**
 - 200 МПа;
 - 20 МПа;
 - 2000 МПа.

- 3. К характеристикам прочности относится:**
 - ударная вязкость;
 - относительное сужение;
 - предел текучести.

- 4. При динамических испытаниях определяют:**
 - твердость;
 - пластичность;
 - ударную вязкость.

- 5. При испытаниях на твердость по Бринеллю в качестве индентора используется:**
 - стальной шарик;
 - алмазная пирамида;
 - алмазный конус.

- 6. Усталость металла – это разрушение при:**
 - статических нагрузках;
 - динамических нагрузках;
 - циклических нагрузках.

- 7. Какой механизм пластической деформации не характерен для ОЦК-металлов?**
 - сдвиг;
 - двойникование;
 - межзеренное скольжение.

- 8. Начало рекристаллизации в чистых металлах происходит при температуре:**
 - $0,2T_{пл}$;
 - $0,4T_{пл}$;
 - $0,6T_{пл}$.

Вариант 3

- 1. Предел текучести характеризует:**
 - сопротивление металла разрушению;
 - сопротивление усталости;
 - сопротивление малым деформациям.

- 2. Относительное сужение обозначается:**
 - δ ;
 - ψ ;
 - σ .

- 3. Каковы единицы измерения предела прочности?**
 - %;
 - МПа;
 - безразмерная.

- 4. Выберите метод измерения твердости для алюминия:**
 - HRB,
 - HV,
 - HRC.

- 5. Предел выносливости определяют при:**
 - статических испытаниях,
 - динамических испытаниях,
 - циклических испытаниях.

- 6. Порог хладноломкости соответствует:**
 - вязкому разрушению;
 - хрупкому разрушению;
 - переходу от вязкого к хрупкому разрушению.

- 7. При пластической деформации происходит:**
 - укрупнение зерна;
 - измельчение зерна;
 - вытягивание зерен.

- 8. Определите (округленно) температуру начала рекристаллизации чистой меди ($t_{пл}=1083^{\circ}\text{C}$):**
 - 430°C ;
 - 270°C ;
 - 540°C .

Вариант 4

1. σ_{-1} - это:

- предел прочности;
- предел выносливости;
- предел упругости.

2. В каком из методов измерения твердости в качестве индентора используется алмазный конус?

- HRA,
- HRB,
- HB.

3. Предел прочности определяют при:

- статических испытаниях,
- динамических испытаниях,
- циклических испытаниях.

4. При радиусе надреза на образце для динамических испытаний 1 мм ударная вязкость обозначается:

- KCU,
- KCV,
- KCT

5. При разрушении под действием знакопеременных нагрузок для образца характерен:

- вязкий излом;
- хрупкий излом;
- усталостный излом.

6. Образование мелкозернистой структуры приводит:

- к повышению ударной вязкости;
- к снижению ударной вязкости;
- не влияет на ударную вязкость.

7. Какова степень пластической деформации, если начальная высота образца составляла 100 мм, а после деформации – 25 мм?

- 50%;
- 25%;
- 75%.

8. При нагреве деформированного металла до $0,2...0,3T_{пл}$:

- образуется новая рекристаллизованная структура;
- укрупняются рекристаллизованные зерна;
- не происходит структурных изменений.

Вариант 5

1. Относительное удлинение определяется при:

- статических испытаниях,
- динамических испытаниях,
- циклических испытаниях.

2. Предел прочности обозначается:

- σ_T ;
- σ_{-1} ;
- σ_B .

3. Чему равно относительное сужение, если площадь сечения образца до испытаний на растяжение – 25 мм², а после испытаний – 20 мм²?

- 20%;
- 25%;
- 5%.

4. Выберите метод измерения твердости для закаленной стали:

- HB,
- HRB,
- HRC.

5. Каковы единицы измерения ударной вязкости?

- МПа;
- Дж/м²;
- %.

6. Максимальное напряжение, при котором образец не разрушается в течение бесконечного или базового числа циклов при знакопеременных нагрузках - это:

- предел прочности;
- предел выносливости;
- предел текучести.

7. При пластической деформации прочность металла:

- увеличивается;
- уменьшается;
- не изменяется.

8. Образованию новых зерен при нагреве деформированного металла соответствует стадия:

- возврата;
- первичной рекристаллизации;
- собирательной рекристаллизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1990. - 528 с.
2. Металловедение и термическая обработка стали: Справочник: В 3 т. / Под ред. М.Л. Берштейна и А.Г. Рахштадта. – Т.1: Методы испытаний и исследований. – М.: Metallurgia, 1983. – 352 с.
3. Жуковец И.И. Механические испытания металлов. – М.: Высшая школа. 1986. – 199 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
2. Методические рекомендации по использованию мультимедийных учебных материалов.....	4
1.1. Общие сведения о мультимедийных учебных материалах.....	4
1.2. Порядок работы с мультимедийным учебным изданием.....	11
3. Механические свойства металлов.....	14
3.1. Характеристики механических свойств, определяемые при статических испытаниях.....	14
3.1.1. Испытания на растяжение.....	15
3.1.2. Методы определения твердости.....	18
3.2. Характеристики механических свойств, определяемые при динамических испытаниях.....	21
3.3. Характеристики механических свойств, определяемые при циклических испытаниях.....	25
3. Пластическая деформация и рекристаллизация.....	28
3.1. Пластическая деформация металлов.....	28
3.1.1. Упругая и пластическая деформация.....	28
3.1.2. Механизмы пластической деформации.....	29
3.1.3. Влияние пластической деформации на свойства металлов.....	31
3.2. Влияние нагрева на структуру и свойства деформированного металла.....	34
3.2.1. Возврат и полигонизация.....	34
3.2.2. Рекристаллизация.....	35
4. Варианты тестовых заданий.....	39
Литература.....	45

Лариса Георгиевна ПЕТРОВА
Ольга Викторовна ЧУДИНА
Андрей Владимирович ОСТРОУХ

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ,
ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ**

Методическое пособие

Редактор Ю.К. Фетисова
Технический редактор Е.К. Евстратова

Подписано в печать 22.05.07 г.

Формат 60x84/16

Печать офсетная

Усл. печ. л. 3,0

Уч.-изд. л. 24

Тираж экз.

Заказ

Цена 20 руб.

Ротапринт МАДИ (ГТУ). 125319, Москва, Ленинградский просп., 64