

**ОПД.Ф.02.02 СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ**
Учебно-методический комплекс

1.2 Трудоемкость дисциплины

Семестр	Количество кредитов	Вид занятий				Количество часов СРС	Общее количество часов	Форма контроля	
		Количество контактных часов			количество часов СРС				всего часов
		лекции	практические занятия	лабораторные занятия					
4	3	30		15	45	90	45	135	экзамен

1.3 Характеристика дисциплины

Дисциплина «Механические свойства материалов» является одной из базовых дисциплин для современного специалиста. Известно, что современное производство выдвигает все более жесткие требования к уровню механических свойств и их стабильности в условиях эксплуатации, что требует проведения комплексных испытаний, имитирующих реальные условия работы деталей машин, конструкций и других инженерных сооружений. Важно уметь способствовать повышению качества различных материалов, в частности, улучшению их механических свойств, которые определяют поведение металлов и сплавов в процессе работы (конструктивную прочность) и при обработке (сопротивление деформированию и технологическую пластичность).

1.4 Цель дисциплины

Целью изучения данной дисциплины является освоение обязательного минимума знаний, который должен получить студент в соответствии с государственным общеобразовательным стандартом высшего профессионального образования, и на этой основе углубленное изучение механических свойств материалов для осуществления его профессиональной деятельности.

1.5 Задача дисциплины

Задачи дисциплины следующие:

- изучение основ учения о механических свойствах и осознание его значимости для будущей профессиональной деятельности;
- овладение научно обоснованными методами научно-исследовательской деятельности;

- приобретение опыта экспериментирования, обработки результатов, составления отчетов, написания рефератов, статей.

В результате изучения данной дисциплины студенты должны:

иметь представление о: дефектах кристаллического строения, процессах деформации и разрушения;

знать:

закономерности влияния состава структуры материалов на механические свойства;

уметь:

определять и проводить статистическую обработку результатов механических испытаний;

приобрести практические навыки:

определения основных механических свойств.

1.6 Пререквизиты

Для изучения данной дисциплины необходимо усвоение следующих дисциплин (с указанием разделов (тем)):

Дисциплина	Наименование разделов (тем)
1. Химия	Периодическая система Д.И. Менделеева. Знаки химических элементов. Химические свойства металлов, неметаллических материалов. Окислительно-восстановительные реакции.
2. Физика	Механика.
3. Теория упругости и пластичности	Полный курс
4. Кристаллография и дефекты кристаллического строения металлов	Полный курс

1.7 Постреквизиты

Знания, полученные при изучении дисциплины «Механические свойства материалов» используются при освоении следующих дисциплин: «Современные методы исследований», «Технологические основы производства порошковых и композиционных материалов», «Теория и технология термической обработки», «Теория и технология химико-термической обработки», «Упрочнение деталей в машиностроении».

1.8 Содержание дисциплины

1.8.1 Содержание дисциплины по видам занятий и их трудоемкость

Наименование раздела (темы)	Трудоемкость дисциплины				
	лекции	практические	лабораторные	СРПС	СРС
1. Напряжения и деформации	2			4	4
2. Классификация механических испытаний	2			2	2
3. Упругие свойства	4			4	4
4. Пластическая деформация	2			4	4
5. Деформационное упрочнение материалов	2			4	4
6. Механические свойства, определяемые при статических испытаниях	6		13	10	10
7. Механические свойства, определяемые при динамических испытаниях	2		2	4	4
8. Механические свойства, определяемые при циклических испытаниях	2			4	4
9. Влияние температуры на прочность и пластичность материалов	2			2	2
10. Разрушение материалов	4			4	4
11. Новый подход к оценке механических свойств	2			3	3
ИТОГО	30		15	45	45

1.9 Список основной литературы

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский М.Л. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Степнев М.Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний. – М.: Машиностроение, 1972. – 336 с.
4. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 296 с.

5. Жуковец Н.И. Механические свойства металлов. – М.: Высшая школа, 1986. – 312 с.
6. Колмаков А.Г. Методы измерения твердости. – М.: Интермет Инжиниринг, 2000. – 412 с.
7. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография. – Челябинск: Металлургия, 1988. – 400 с.
8. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Колмаков А.Г., Рыбакова Л.М.. Методы испытаний на трение и износ /– М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 496 с.
9. Ржевская С.В. Материаловедение.– М.: МГТУ, 2000.– 280 с.

1.10 Список дополнительной литературы

10. Кабалдин Ю.Г., Семашко Н.А., Евстигнеев А.И. Интеллектуальный подход к процессам разрушения и синтеза материалов // Металлургия машиностроения. – 2002. - № 5. С. 13-16.
11. Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин. – Л.: Наука, 1974.
12. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.
13. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Механические свойства материалов». Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И., Атамбаев Ж.Н., КарГТУ, 2005 г.
14. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. М.: Машиностроение, 1974.
15. Coyttrell A.H. The Mechanical Properties of Matter. John Wiley, N.Y.-L.-Sidney. 1958.

1.11 Критерии оценки знаний студентов

Экзаменационная оценка по дисциплине определяется как сумма максимальных показателей успеваемости по рубежным контролям (до 50 %) и итоговой аттестации (экзамену) (до 50 %) и составляет значение до 100 % в соответствии с таблицей.

Оценка по буквенной системе	Баллы	%-ное содержание	Оценка по традиционной системе
А цифровой эквивалент	4,0	95-100	Отлично
А-	3,67	90-94	
В+	3,33	85-89	Хорошо
В	3,0	80-84	
В-	2,67	75-89	
С+	2,33	70-74	Удовлетворительно
С	2,0	65-69	
С-	1,67	60-64	
Д+	1,33	55-59	
Д	1,0	50-54	
Е	0	0-49	Неудовлетворительно

Рубежный контроль проводится на 5-й, 10-й, 15-й неделях обучения и складывается исходя из следующих видов контроля:

Вид контроля	%ное содержание	Академический период обучения, неделя															Итого, %	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
Посещаемость	0,2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	3,0
Конспекты лекций	1,0					*					*						*	3,0
Тестовый опрос	7,0					*					*						*	21
Реферат	2,0																*	2,0
Допуск к лаб. работам	0,5	*		*		*		*		*		*		*				3,5
Лаб. работы	0,5		*		*		*		*		*		*		*			3,5
Защита лаб. работ	2,0			*		*		*		*		*		*			*	14
Экзамен																		50
Всего																		100

1.12 Политика и процедуры

При изучении дисциплины «Механические свойства материалов» прошу соблюдать следующие правила:

1. Не опаздывать на занятия.
2. Не пропускать занятия без уважительной причины.
3. Отключать сотовые телефоны во время занятий, соблюдать тишину и порядок.
4. Активно участвовать в учебном процессе.
5. Быть терпимыми, открытыми, откровенными и доброжелательными к сокурсникам и преподавателям.

1.13 Учебно-методическая обеспеченность дисциплины

Ф.И.О. автора	Наименование учебно-методической литературы	Издательство, год издания	Количество экземпляров	
			в библиотеке	на кафедре
Основная литература				
1. Золотаревский В.С.	Механические свойства металлов	М.: Металлургия 1983, 1998.	15	2
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А.	Механические свойства металлов	М.: Металлургия 1979.	10	-

3. Степнев М.Н.	Статистическая обработка результатов механических испытаний	М.: Машиностроение, 1972.	1	-
4. Костин П.П.	Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов	М.: Машиностроение, 1990.	5	1
5. Жуковец Н.И.	Механические свойства металлов	М.: Высшая школа, 1986.	5	2
6. Колмаков А.Г.	Методы измерения твердости	Интермет Инжиниринг, 2000.	1	-
7. Иванова В.С., Шанявский А.А.	Количественная фрактография	Челябинск: Металлургия, 1988.	5	1
8. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Колмаков А.Г., Рыбакова Л.М.	Методы испытаний на трение и износ	М.: Интермет Инжиниринг, 2001.	1	-
9. Ржевская С.В.	Материаловедение	М.: МГТУ, 2000.–	1	-
Дополнительная литература				
10. Кабалдин Ю.Г., Семашко Н.А., Евстигнеев А.И.	Интеллектуальный подход к процессам разрушения и синтеза материалов	Металлургия машиностроения. – 2002. - № 5. С. 13-16.	1	-
11. Зайдель А.Н.	Ошибки измерений физических величин	Л.: Наука, 1974	10	-
12. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И.,	«Механические свойства материалов»	Учебное пособие по курсу, КарГТУ, 2004	10	50
13. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И., Атамбаев Ж.Н.,	«Механические свойства материалов»	Методические указания к лабораторным работам по курсу КарГТУ, 2005 г.	10	50
14. Фридман Я.Б.	Механические свойства металлов	М.: Машиностроение, 1974.	-	-
15. Coyttrell A.H.	The Mechanical Properties of Matter.	John Wiley, N.Y.-L.-Sidney. 1958.	-	-

2 График выполнения и сдачи заданий по дисциплине

Вид контроля	Цель и содержание задания	Рекомендуемая литература	Продолжительность выполнения	Форма контроля	Срок сдачи
Выполнение лабораторной работы № 1	Ознакомиться с оборудованием и получить практические навыки работы с образцами при растяжении	[1], [2], [4], [5], [13]	2 недели	Текущий	2 неделя
Выполнение лабораторной работы № 2	Ознакомиться с оборудованием и получить практические навыки работы с образцами при сжатии	[1], [2], [4], [5], [13]	2 недели	Текущий	4 неделя
Тестовый опрос	Закрепление теоретических знаний и практических навыков	[1], [2], [9], [12], конспект лекций	1 контактный час	Рубежный	5 неделя
Выполнение лабораторной работы № 3	Закрепление теоретических знаний о динамических испытаниях	[1], [2], [4], [5], [13]	2 недели	Текущий	6 неделя
Выполнение лабораторной работы № 4	Ознакомиться с оборудованием и получить практические навыки работы с образцами при определении твердости различными способами	[1], [2], [5], [6], [13]	2 недели	Текущий	8 неделя
Выполнение лабораторной работы № 5	Получить практические навыки работы при определении твердости на МЕТ-Д1	[1], [2], [5], [6], [13]	2 недели	Текущий	10 неделя
Тестовый опрос	Закрепление теоретических знаний и практических навыков	[1], [2], [9], [12] конспект лекций	1 контактный час	Рубежный	10 неделя
Выполнение лабораторной работы № 6	Получить практические навыки работы при определении микротвердости	[1], [2], [5], [6], [13]	2 недели	Текущий	12 неделя
Выполнение	Закрепление	[1], [4], [9],	2 недели	Текущий	14 неделя

лабораторной работы № 7	теоретических знаний об испытаниях на сжатие древесины вдоль волокон, набухасмости	[13]			
Тестовый опрос	Закрепление теоретических знаний и практических навыков	[1], [2], [4], [7], [8], [9], [12], конспект лекций	1 контактный час	Рубежный	15 неделя
Реферат	Определение навыков работы с литературой	[1], [2], [3], [7], [9], [10], [11], [12], [13], [14]	В течение семестра	Текущий	15 неделя
Экзамен	Проверка усвоения материала дисциплины	Весь перечень основной и дополнительной литературы	2 контактных часа	Итоговый	В период сессии

3 Конспект лекций

Раздел 1 Напряжения и деформации

Тема 1 Напряжения и деформации (2 часа)

План лекции

1. Современная трактовка физического и технического смысла важнейших механических свойств.
2. Напряжения.
3. Нормальные и касательные напряжения.
4. Тензор напряжений.
5. Деформация.
6. Тензор деформации.

Основные понятия

Деформация – изменение взаимного расположения частиц тела, как правило, вызывающее изменение его размеров и формы.

Упругость – свойство тел деформироваться под нагрузкой и затем, после устранения сил восстанавливать свое первоначальное состояние. Часть деформации, которая исчезает после снятия нагрузки, называется упругой, а та часть, которая остается – остаточной (пластической) деформацией.

Пластичность – свойство материалов под действием внешних нагрузок изменять, не разрушаясь, свою форму и размеры и сохранять остаточные деформации после снятия этих нагрузок.

Прочность – способность материала противостоять нагрузке, не разрушаясь.

Твердость – способность материала противостоять внедрению в него другого материала.

Жесткость – способность материала не гнуться под воздействием приложенной нагрузки.

Вязкость – свойство материалов необратимо поглощать энергию при их пластическом деформировании.

Хрупкость – способность твердых тел разрушаться при механических воздействиях без заметной пластической деформации.

Дислокации – линейные искажения типа обрыва или сдвига атомных слоев, нарушающие правильность их чередования в решетке. Бывают краевые и винтовые дислокации.

Статическая нагрузка – это однократно приложенная нагрузка, плавно и относительно медленно возрастающая от нуля до своей максимальной точки.

Динамическая нагрузка – это однократно приложенная нагрузка, действующая на материал резко, и с большой скоростью возрастающая от нуля до своей максимальной величины.

Повторно-переменная нагрузка – это нагрузка, многократно прикладываемая к материалу, причем скорости возрастания и убывания нагрузки могут быть различные.

Напряжения. Тензор напряжений

Большинство механических свойств выражается через величину *напряжений*.

Понятие «напряжение» введено для оценки величины нагрузки, не зависящей от размеров деформируемого тела. Напряжение является, таким образом, удельной величиной и определяется как соотношение

$$S = \frac{P}{F},$$

где S – напряжение на площадке F , перпендикулярной оси образца, вдоль которой действует сила P (рисунок 1, а).

Для определения величины напряжений в каком-то сечении тела последнее рассекают на две части, затем одну часть тела мысленно отбрасывают, а ее действие на оставшуюся часть заменяют внутренними силами (рисунок 1, б).

В системе СИ напряжения выражаются в ньютонах на квадратный метр (Н/м^2 , МН/м^2). На практике часто используют размерность напряжений кгс/мм^2 ($1 \text{ кгс/мм}^2 = 9,8 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$).

В общем случае сила не перпендикулярна плоскости площадки, на которую она действует. Тогда ее можно разложить на две составляющие: *нормальную* (перпендикулярную к площадке), создающую нормальное напряжение, и *касательную*, действующую в плоскости площадки и вызывающую касательные напряжения (рисунок 1, в). В механических испытаниях определяют именно эти напряжения. Их же используют и в расчетах на прочность. Одни процессы при деформировании и разрушении определяются касательными напряжениями (пластическая деформация, срез), другие – нормальными (разрыв).

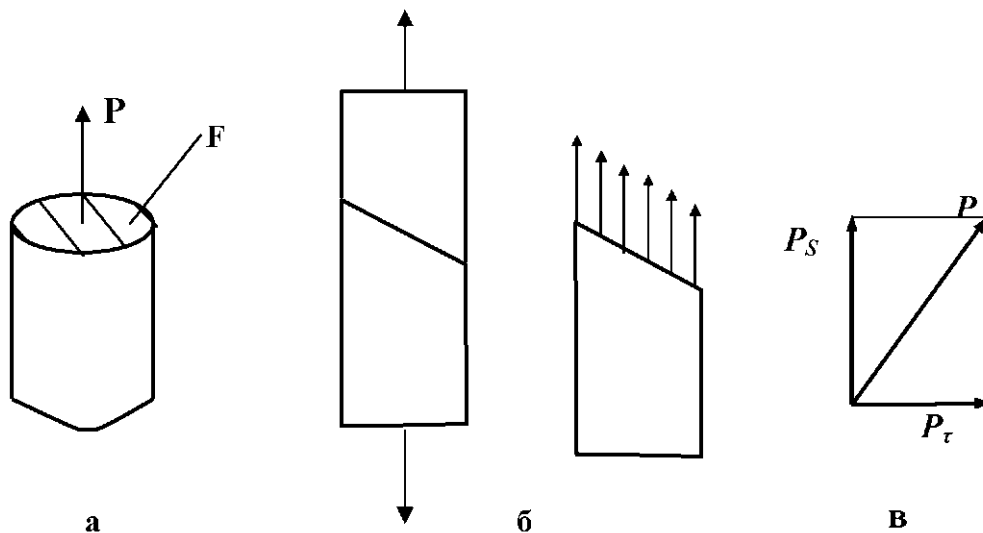


Рисунок 1 – Схемы к определению напряжений

Нормальные напряжения делят на растягивающие (положительные) и сжимающие (отрицательные).

При решении реальных задач необходимо иметь возможность оценить напряжения, действующие в любом сечении тела. Для этого используют представление о тензоре напряжений.

Внутри тела, находящегося под действием напряжений, всегда можно выделить бесконечно малый по размерам параллелепипед, ребра которого параллельны произвольно выбранным осям координат (рисунок 2). В общем случае на три его непараллельные грани действуют взаимно уравновешенные векторы напряжений, которые можно разложить на нормальные и касательные. В результате параллелепипед находится под действием девяти напряжений – трех нормальных (S_x, S_y, S_z) и шести касательных ($t_{xy}, t_{xz}, t_{yx}, t_{yz}, t_{zy}, t_{zx}$). Совокупность этих напряжений и есть тензор напряжений, который записывается в такой форме:

$$(S) = \begin{pmatrix} S_x & t_{xy} & t_{xz} \\ t_{yx} & S_y & t_{yz} \\ t_{zx} & t_{zy} & S_z \end{pmatrix}.$$

Чтобы выбранный нами параллелепипед находился в равновесии и не вращался, необходимо равенство моментов относительно координатных осей. Поэтому $t_{xy}=t_{yx}, t_{zy}=t_{yz}, t_{xz}=t_{zx}$ (закон парности касательных напряжений). Следовательно, тензор напряжений содержит фактически не девять, а шесть независимых напряжений. С их помощью можно охарактеризовать любое сложное напряженное состояние. Тензор позволяет определять величину нормальных и касательных напряжений в любой площадке, проходящей через данную точку тела, если известны ее направляющие косинусы (косинус угла

между площадкой и соответствующей осью координат) относительно выбранных осей координат.

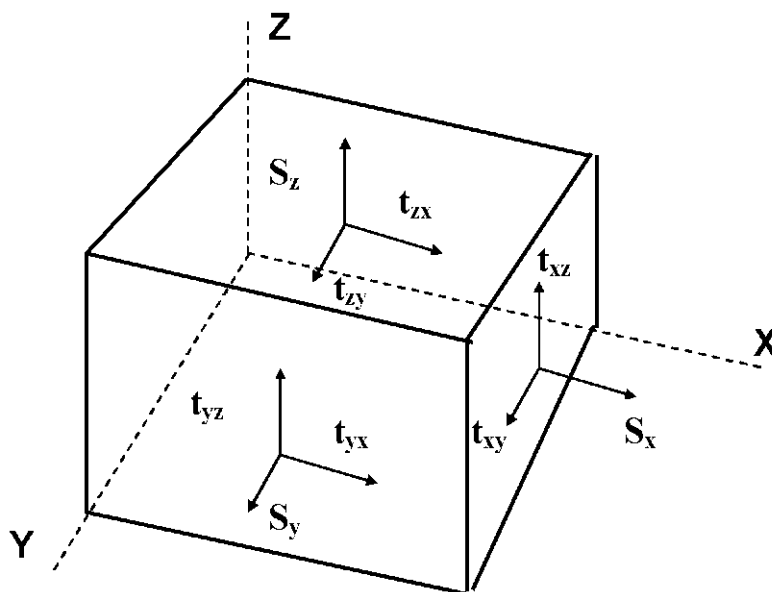


Рисунок 2 – Взаимно уравновешенные напряжения, действующие на грани параллелепипеда

Главные площадки – площадки, на которых действуют только нормальные напряжения, касательные напряжения равны нулю.

При механических испытаниях главные направления напряжений обычно заранее известны, и их можно выбрать в качестве координатных осей. Тогда тензор напряжений упрощается и принимает вид:

$$(S) = \begin{pmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{pmatrix},$$

где S_1 , S_2 , S_3 – наибольшее, среднее и наименьшее главное нормальное напряжение соответственно.

При любом напряженном состоянии максимальные касательные напряжения τ_{max} действуют на площадках, расположенных под углом 45° к главным осям, а их величина равна полуразности соответствующих главных нормальных напряжений:

$$\tau_{max} = \frac{S_{max} - S_{min}}{2}.$$

Деформация. Тензор деформации

Под действием напряжений все материалы деформируются, то есть изменяют форму и размеры. По результатам механических испытаний оценивают различные характеристики упругой, а чаще остаточной деформации. Наиболее широко используются следующие характеристики деформации: удлинение (укорочение), сдвиг и сужение (уширение) образцов.

Увеличение длины образца в результате деформации обычно характеризуют относительным удлинением:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\% = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%,$$

где l_k – конечная длина;

l_0 – начальная длина;

Δl – абсолютное удлинение (рисунок 3, а).

Величина δ является условной характеристикой, поскольку деформация с самого начала развивается на непрерывно изменяющейся длине l и отношение $\Delta l/l_0$ лишено физического смысла.

Истинное относительное удлинение

$$e = \int_{l_0}^{l_k} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_k}{l_0}.$$

Удлинение и укорочение образца обычно происходит под действием нормальных напряжений. Касательные напряжения вызывают сдвиговые деформации, которые оценивают по углу сдвига α (в радианах) или по величине относительного сдвига $g = tg\alpha$ (рисунок 3, б).

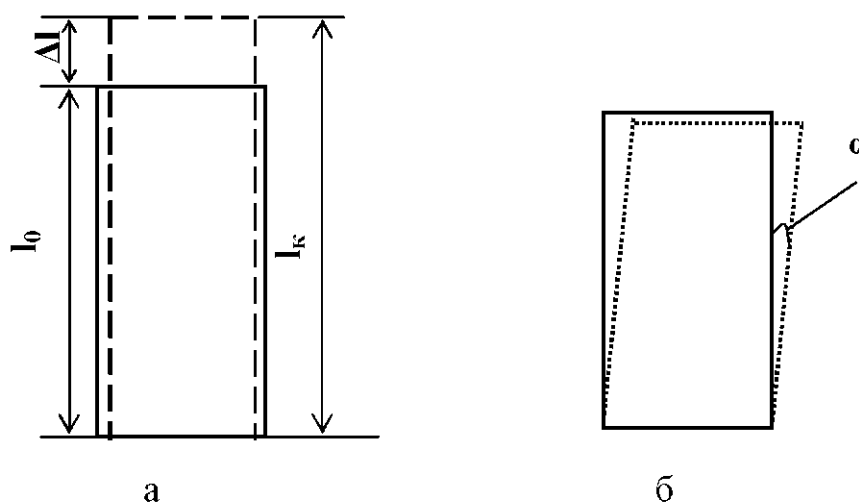


Рисунок 3 – Удлинение (а) и сдвиг (б) при деформации

Относительные удлинения и сдвиги (e и g) – фундаментальные характеристики деформации, которые используются в теориях пластичности и упругости. Совокупность удлинений и сдвигов – тензор деформации – по аналогии с тензором напряжений характеризует любое деформированное состояние в данной точке и позволяет определять e в любом направлении и g в любой плоскости. В случае если три главных направления деформации (в которых сдвиги равны нулю) заранее известны и их можно совместить с осями координат, тензор деформации характеризуется совокупностью трех удлинений:

$$g = \begin{pmatrix} e_1 & 0 & 0 \\ 0 & e_2 & 0 \\ 0 & 0 & e_3 \end{pmatrix},$$

где e_1 , e_2 , e_3 – наибольшее, среднее и наименьшее по величине удлинение соответственно.

Третьей широко используемой характеристикой деформации является относительное сужение ψ :

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%,$$

где F_0 и F_k – начальная и конечная площадь поперечного сечения образца соответственно.

Между e , δ и ψ существует функциональная связь в области равномерных деформаций, то есть пока величина относительных изменений формы и размеров во всех точках рабочей части образца одинакова. Эта связь следует из условия постоянства объема при пластической деформации.

$$e - \ln(l_k/l_0) - \ln(F_0/F_k) - \ln(1/(1-\psi)) - \ln(1+\delta).$$

Помимо этих трех характеристик деформации, используют и другие, частные. Например, величину деформации при испытании на изгиб можно оценивать по стреле прогиба, а на кручение – по углу скручивания.

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 296 с.
4. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

Контрольные задания для СРС (тема 1) [1], [2], [3], [9]

1. Истинное и условное удлинение.
2. Функциональная связь между различными характеристиками деформации.
3. Схемы напряженного состояния.
4. Примеры реализации схем напряженного состояния.
5. Условия подобия механических испытаний.

Раздел 2 Классификация механических испытаний

Тема 1 Классификация механических испытаний (2 часа)

План лекции

1. Способы нагружения образцов.

2. Статические нагрузки.
3. Динамические нагрузки.
4. Циклические нагрузки.
5. Испытания на твердость.
6. Испытания на ползучесть и длительную прочность.
7. Условия подбора механических испытаний.

Классификация и виды механических испытаний

Используют два способа нагружения образца: 1) путем его деформации с заданной скоростью и измерением сил сопротивления образца этой деформации и 2) подачей постоянной нагрузки на образец с измерением возникающей при этом деформации.

Наиболее распространен первый способ, обеспечивающий возможность непрерывного измерения и записи силы сопротивления образца деформированию. Он используется практически во всех разновидностях статических испытаний.

Важнейшие примеры применения второго способа нагружения – испытания на ползучесть и длительную прочность.

По характеру изменения во времени нагрузки подразделяют на статические, динамические и циклические. *Статические* нагрузки характеризуются относительно медленным возрастанием от нуля до некоторой максимальной величины (обычно секунды – минуты). При *динамическом* нагружении это возрастание происходит за очень короткий промежуток времени (доли секунды). *Циклические* нагрузки характеризуются многократными изменениями по направлению и (или) по величине.

В соответствии с характером действующих нагрузок различают статические, динамические и циклические испытания.

Статические испытания отличаются плавным, относительно медленным изменением нагрузки образца и малой скоростью его деформации, а также такой малой величиной ускорения движущихся частей машины, что возникающими в них силами инерции можно пренебречь. При статических испытаниях можно методом простого статического равновесия с достаточной точностью определять усилия и деформации, а также величины работы деформации в любой момент испытания.

Наиболее важны следующие виды статических испытаний, отличающиеся схемой приложения нагрузок к образцу: одноосное растяжение, одноосное сжатие, изгиб, кручение.

Динамические испытания характеризуются приложением к образцу нагрузок с резким изменением их величины и большой скоростью их деформации. Динамическую нагрузку создают ударом по образцу свободно падающей тяжелой массы. В результате в отдельных частях образца и испытательной машины возникают значительные силы инерции. В результате динамических испытаний определяют величину полной или удельной работы динамических деформаций, а также величину остаточной деформации образца. Динамические испытания чаще всего проводят по схеме изгиба.

Для испытаний на усталость характерно многократное приложение к образцу изменяющихся нагрузок. Такие испытания обычно длительны (часы – сотни часов). По результатам усталостных испытаний определяют число циклов до разрушения при разных значениях напряжений, а в конечном итоге – то предельное напряжение, которое образец выдерживает без разрушения в течение определенного числа циклов нагружения. При усталостных испытаниях используют различные схемы приложения нагрузок: изгиб, растяжение, сжатие, кручение.

Существуют еще две большие *специфические* группы испытаний. Первая из них – это испытания на твердость, в которых оценивают различные характеристики сопротивления деформации или разрушению поверхностных слоев образца при взаимодействии с другим телом – *индентором*. Большинство разновидностей испытаний на твердость – статическое.

Вторая группа – испытания на ползучесть и длительную прочность. Их обычно проводят при повышенных температурах для оценки характеристик жаропрочности. Образцы в течение всего испытания находятся под постоянным напряжением. При испытании на ползучесть измеряют величину деформации в функции времени при разных напряжениях на образце, а в результате испытаний на длительную прочность оценивают время до разрушения под действием различных напряжений.

Испытания проводятся при различных температурах, начиная от очень низких отрицательных и кончая температурами в интервале плавления, в разных средах и т. д.

Необходимо выполнение определенных условий проведения испытаний, которые бы обеспечили постоянство результатов при многократном повторении испытаний. Соблюдение этих правил должно гарантировать сопоставимость результатов испытаний, проведенных в разное время, в разных лабораториях, на разном оборудовании и т. д. Условия, обеспечивающие такое постоянство и сопоставимость результатов, называются *условиями подобия механических испытаний*.

Для этого необходимо соблюдение трех видов подобия:

- 1) геометрического (форма и размеры образца);
- 2) механического (схема и скорость приложения нагрузок);
- 3) физического (внешние физические условия).

Форма и размеры образца влияют на результаты испытания через схему напряженного состояния, которая зависит от формы тела и определенного расположения точек приложения нагрузок.

В общем виде механическое подобие заключается в том, чтобы в сходных сечениях рабочей части образцов возникали тождественное напряженное состояние и одинаковая относительная деформация. Если можно пренебречь влиянием скорости деформации, то условие механического подобия сведется к тому, чтобы все прилагаемые к образцу внешние силы были подобно направлены и приложены в соответствующих точках. При больших скоростях деформации соблюдение механического подобия в разных по размеру образцах усложняется.

Для получения сопоставимых результатов и правильного их анализа большое значение имеет методика изготовления образцов для испытаний. В каждом случае она должна быть оговорена. Один и тот же материал в зависимости от условий его получения (скорости кристаллизации при литье, степени обжатия при прокатке и т. д.) может обладать различными свойствами. Поэтому для получения сравнимых данных всегда необходимо соблюдать идентичность режимов (а не только методов) получения и обработки заготовок для образцов, изготавливать их (например, на станках) по одной технологии.

Способ изготовления образца должен быть такой, чтобы в последнем создавалась структура, идентичная структуре соответствующей детали. При изготовлении образцов заданной формы нужно использовать такие методы обработки, которые не меняют свойств металла, присущих ему в заготовке или изделии. Поэтому образцы в процессе изготовления нельзя нагревать значительно выше комнатной температуры, подвергать пластическим деформациям (наклеп) и т. д. Большое значение имеет качество поверхности образцов. Поверхностные дефекты (царапины, риски) служат концентраторами напряжений и снижают характеристики прочности и пластичности.

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 296 с.
4. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

Контрольные задания для СРС (тема 1) [1], [2], [4], [9]

1. Способы нагружения образцов.
2. Специфические группы испытаний.
3. Критерии подобия механических испытаний. Цель. Примеры.

Раздел 3 Упругие свойства и неполная упругость металлов

Тема 1 Упругие свойства (2 часа)

План лекции

1. Закон Гука.
2. Константы упругих свойств.
3. Модуль Юнга, модуль сдвига и коэффициент Пуассона
4. Методы определения упругих свойств:
5. Резонансный метод.
6. Импульсный метод.
7. Крутильный маятник

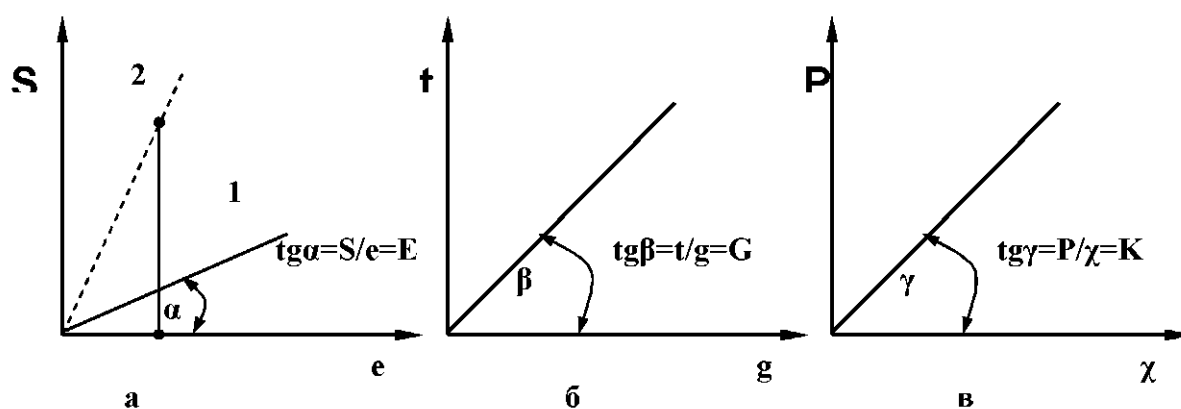
Закон Гука и константы упругих свойств.

Стадию упругой деформации образцы проходят при всех без исключения видах механических испытаниях.

Поведение металлов при упругой деформации описывается законом Гука, который определяет прямую пропорциональность между напряжением и упругой деформацией. На рисунке 4 показаны начальные (упругие) участки кривых *напряжение – деформация* при одноосном растяжении, кручении и гидростатическом сжатии.

Наклон каждой из этих трех кривых, т. е. коэффициент пропорциональности, связывающий напряжения и деформацию, характеризует модуль упругости:

$$E=S/e; G=t/g; K=P/\chi.$$



а – одноосное растяжение; б – кручение; в – гидростатическое сжатие
Рисунок 4 – Упругие участки кривых напряжение – деформация

Модуль E , определяемый при растяжении, называется модулем нормальной упругости, или модулем Юнга. Модуль G – модуль сдвига (касательной упругости). K – модуль объемной упругости (P – гидростатическое давление, χ – уменьшение объема). Модули упругости определяют жесткость материала, т. е. интенсивность увеличения напряжения по мере упругой деформации.

Механизм упругой деформации металлов состоит в обратимых смещениях атомов из положения равновесия в кристаллической решетке. Чем больше величина смещения каждого атома, тем больше упругая макродеформация всего образца. Величина этой упругой деформации металлов не может быть большой (относительное удлинение в упругой области обычно меньше одного процента), т. к. атомы кристаллической решетки способны упруго смещаться лишь на небольшую долю межатомного расстояния. Физический смысл модулей упругости как раз и состоит в том, что они характеризуют сопротивляемость металлов упругой деформации, т. е. смещению атомов из положений равновесия в решетке. Если сравнивать два металла, например, с разными e (рисунок 4, а, прямые 1, 2), то для одинакового смещения атомов (равной упругой деформации) при большем e потребуется большее напряжение (прямая 2). При сложных схемах напряженного состояния деформация может не

совпадать по направлению с напряжением. Для изотропного тела закон Гука, устанавливающий линейную связь между напряжениями и деформациями в любых направлениях:

$$\begin{aligned}e_x &= 1/E \cdot [S_x - \nu \cdot (S_y + S_z)], \\e_y &= 1/E \cdot [S_y - \nu \cdot (S_x + S_z)], \\e_z &= 1/E \cdot [S_z - \nu \cdot (S_x + S_y)], \\g_{xy} &= t_{xy}/G, \\g_{xz} &= t_{xz}/G, \\g_{yz} &= t_{yz}/G,\end{aligned}$$

где ν – коэффициент Пуассона при одноосном растяжении (сжатии), характеризующий отношение поперечной относительной деформации к продольной.

Коэффициент Пуассона ν – четвертая важная константа упругих свойств после модулей упругости. Эти четыре константы связаны между собой:

$$E = 2 \cdot G \cdot (1 + \nu);$$

$$E = 3 \cdot K \cdot (1 - 2 \cdot \nu).$$

Зная две из них, можно рассчитать остальные.

Обобщенный закон Гука записывается относительно просто для изотропного тела. Металлы имеют кристаллическую структуру и являются телами анизотропными. Чем меньше расстояние между соседними атомами, тем больше в данном направлении должен быть модуль упругости. Для анизотропного тела закон Гука существенно усложняется: он отражает прямую пропорциональность между каждым компонентом тензора деформации и всеми шестью независимыми компонентами тензора напряжений.

Модули упругости являются важнейшими характеристиками прочности межатомной связи. Их величина зависит от всех факторов, определяющих силы межатомного взаимодействия. С повышением температуры модули упругости снижаются. При легировании металлов элементами, образующими твердые растворы, модули упругости меняются линейно, причем могут увеличиваться и уменьшаться.

Методы определения упругих свойств: резонансный, импульсный

Некоторые константы упругих свойств можно определить с помощью стандартных статических испытаний. В частности, по результатам испытаний на растяжение оценивают E , на кручение G . Чаще модули упругости измеряют с использованием специальных динамических методов, отличающихся более высокой точностью, а коэффициент Пуассона находят по результатам рентгеноструктурного анализа, определяя период решетки упруго-напряженного образца вдоль и поперек направления деформации.

Особенно хорошо разработаны динамические методы определения модуля сдвига G и модуля нормальной упругости E . Все динамические методы

базируются на том, что частота колебаний исследуемого образца (*резонансные методы*) или скорость звука в нем (*импульсные методы*) зависят от констант упругости.

При использовании резонансных методов образец в виде стержня возбуждается до одной из собственных частот продольными или поперечными волнами. Длина этих волн должна быть значительно больше радиуса образца.

Тогда в момент совпадения частоты вынуждающих колебаний с собственной частотой колебаний образца в нем возникает *стоячая волна*. Модуль E связан с резонансной частотой $\omega_{рез}$ соотношением (для достаточно длинного стержня)

$$E = 4 \cdot \rho \cdot l \cdot \omega_{рез} \cdot \Delta,$$

где ρ – плотность материала образца;

l – длина образца;

Δ – коэффициент, определяемый как $\Delta = 1 + \frac{1}{2} \frac{\pi^2 \nu^2 r^2}{l^2}$;

r – радиус образца;

ν – коэффициент Пуассона.

Возбуждение механических колебаний частотой $10^2 \dots 10^5$ Гц в образцах может производиться различными способами. Частоту колебаний, в том числе и резонансную, можно определить с помощью осциллографа.

Для определения модуля сдвига G используется крутильный маятник. Частота его колебаний связана с модулем G :

$$\omega = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{\pi \cdot r^4 \cdot G}{2 \cdot l \cdot I}},$$

где r – радиус образца;

l – его длина;

I – момент инерции груза.

Экспериментальное определение модуля сдвига проводят на тех же установках, что и определение внутреннего трения.

В импульсных методах определения констант упругости используют частоты порядка мегаГерц. Применение этих методов основано на зависимости скорости звука (v) от констант упругости среды, в которой он распространяется:

$$v_{прод} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}},$$

$$v_{попер} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}.$$

Таким образом, определяя скорости распространения продольных и поперечных звуковых волн в образце, диаметр которого намного больше длины

волны, можно найти модули упругости материала образца. Для подачи ультразвуковых импульсов используют ультразвуковые генераторы, а для изменения $v_{прод}$ и $v_{попер}$ – пьезокристалл кварца, связанный через усилители с электронным осциллографом.

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 296 с.
4. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

Тема 2 Неполная упругость металлов. Эффект Баушингера. Упругое последствие. Внутреннее трение (2 часа)

План лекции

1. Упругие свойства.
2. Эффект Баушингера.
3. Упругое последствие.
4. Внутреннее трение.
5. Экспериментальные методы определения внутреннего трения.
6. Блок-схема крутильного маятника.

В области упругой деформации у металлов и сплавов наблюдается ряд отклонений от чисто упругого поведения.

Одним из известных проявлений неполной упругости металлов является эффект Баушингера. Он заключается в том, что при повторном нагружении пластически слабдеформированного образца в обратном направлении его сопротивление малым пластическим деформациям снижается. Допустим, мы растянули образец на 1...2 % (до точки a , рисунок 5). Теперь снимем нагрузку и будем подвергать его сжатию. Кривая напряжение – деформация ($O'ac$) будет лежать ниже соответствующей кривой ($O'b$), которую мы получили бы при повторном растяжении. Если точка b соответствует здесь началу пластической деформации, то отрезок $bc - \delta_B$ представляет так называемую *баушингеровскую деформацию*, которая является одной из основных количественных характеристик эффекта Баушингера.

Процесс, определяющий этот эффект, состоит в обратном движении дислокаций, порожденных различными источниками при первоначальном растяжении. На начальных стадиях деформации постепенно растущее число генерируемых дислокационных петель движется относительно легко и на значительные расстояния вплоть до остановки у каких-либо барьеров. Возникающая дислокационная структура достаточно стабильна и мало меняется в результате разгрузки. Поэтому при повторном растяжении сопротивление

деформированию либо несколько возрастает, либо практически не меняется по сравнению с первоначальным. При изменении же знака напряжения дислокации вынуждены двигаться обратно по направлению к источникам. В результате перемещения дислокаций появляется дополнительная баушингеровская деформация.

После значительной предварительной пластической деформации перераспределение дислокаций при обратном нагружении затрудняется и баушингеровская деформация приближается к нулю.

Особенно большое практическое значение эффект Баушингера имеет при эксплуатации и испытаниях в условиях циклического нагружения.

К важным проявлениям неполной упругости металлов относится упругое последствие. Оно свидетельствует о том, что не вся обратимая деформация металла является чисто упругой. Возьмем образец и создадим в нем напряжение в пределах упругого участка кривой напряжение – деформация [1]. После разгрузки такой образец будет иметь те же размеры, что и до нагружения. Проследим, однако, как будет изменяться его удлинение во времени под действием приложенного напряжения и после разгрузки. Соответствующая диаграмма представлена на рисунке 6.

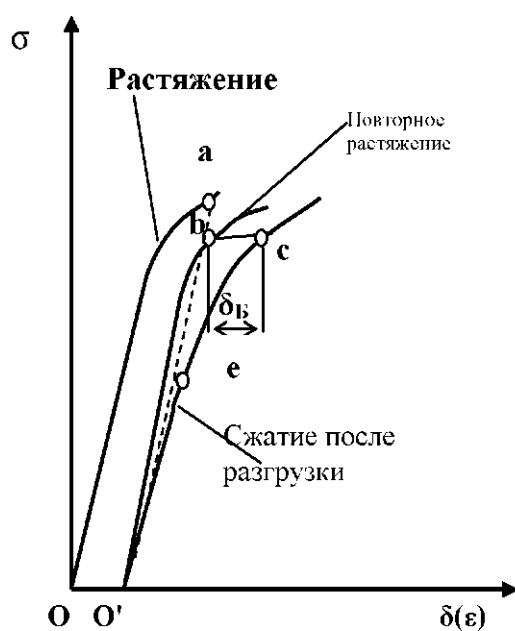


Рисунок 5 – Схема эффекта Баушингера

Оказывается, что образец деформируется чисто упруго лишь на величину OC , а затем удлиняется гораздо медленнее по закону, близкому к параболическому. После разгрузки в точке K происходит очень быстрое снятие чисто упругой деформации ($KM \approx OC$), а затем – относительно медленное – остальной деформации. В конце концов, $\delta = \theta$ (в точке N), образец имеет исходные размеры, однако ясно, что далеко не вся обратимая деформация является чисто упругой.

Механизм упругого последствия может быть связан с перемещением точечных дефектов, например, в металлах с о.ц.к.-решеткой – атомов примесей

внедрения. Под действием напряжения происходит постепенное перераспределение примесных атомов – они стремятся занять междоузлия на ребрах вдоль оси нагружения, где они вызывают наименьшие искажения решетки. В результате решетка и весь образец достаточно удлиняются вдоль направления действия нагрузки. Это происходит не мгновенно.

Скорость упругого последействия, а также величина зависят от структуры материала и условий его испытания. Например, повышение температуры резко увеличивает скорость последействия (в цинке – на 50% при повышении температуры на 15°).

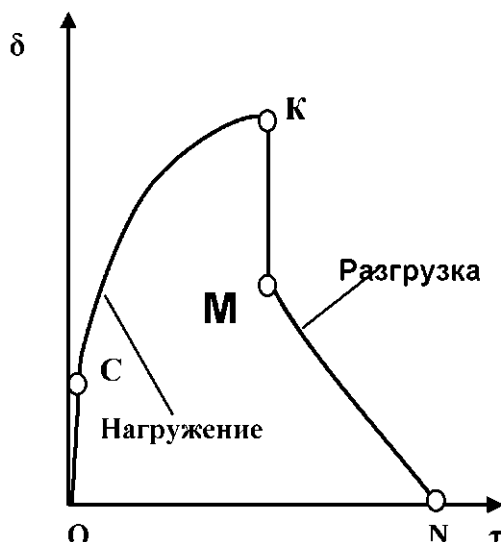


Рисунок 6 – Схема упругого последействия

Неупругие эффекты служат причинами *внутреннего трения*, характеризующего необратимые потери энергии внутри металла. Линии диаграммы напряжение – деформация при нагрузке и разгрузке из-за неполной упругости металлов не совпадают (рисунок 7), а образуют петлю гистерезиса. Ее площадь и характеризует энергию, рассеянную за один цикл нагружения.

Знание величины внутреннего трения необходимо для грамотного выбора материала, работающего в определенных условиях. Например, демпфирующие материалы для амортизаторов должны обладать высоким внутренним трением. Наоборот, многие детали измерительных приборов не должны рассеивать упругую энергию, чтобы обеспечить малую инерционность и высокую точность измерений.

Для экспериментальной оценки величины внутреннего трения необходимо знать связь между напряжением и деформацией при нагружении и разгрузке (рисунок 7). На практике используют динамические методы с периодическим изменением нагрузки, например, по синусоидальному закону. Такому изменению нагрузки будет соответствовать и периодическое изменение деформации, но из-за явления неупругости деформации неизбежно будет отставать от напряжения по фазе на какой-то угол φ . Величина $tg\varphi$ – одна из характеристик рассеяния энергии колебаний, т. е. внутреннего трения. Другую

характеристику можно получить, оценив площадь петли. Эта площадь пропорциональна величине потерь ΔW энергии колебаний за один цикл. За меру внутреннего трения принимают величину $\Delta W/2\pi W$, где W – полная энергия деформации.

Еще одна характеристика – логарифмический декремент затухания амплитуды колебаний γ . Он равен натуральному логарифму отношения предыдущего максимального отклонения колеблющегося образца к последующему.

$$\operatorname{tg}\varphi \approx \gamma/\pi \approx \Delta W/2\pi W = Q^{-1},$$

где Q^{-1} – широко используемое обозначение внутреннего трения.

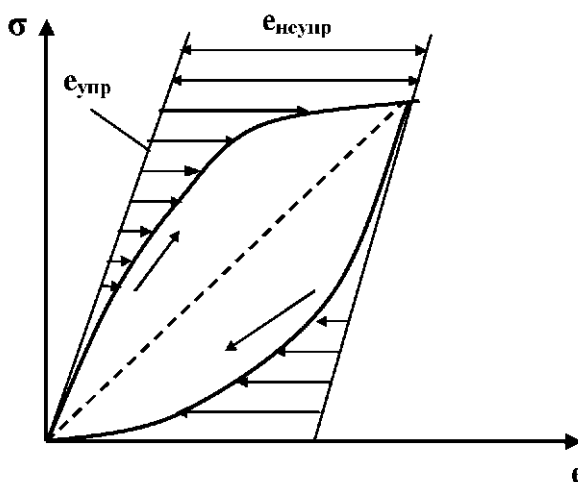


Рисунок 7 – Образование петли гистерезиса в результате неупругих явлений

Из экспериментальных методов исследования внутреннего трения наиболее распространен метод крутильного маятника. В прямом крутильном маятнике образец в виде проволоки или ленты используется в качестве упругого подвеса, к нижнему концу которого крепится инерционная масса, снижающая частоту крутильных колебаний до 1 Гц. Это позволяет регистрировать колебания визуально, наблюдая за перемещением светового зайчика, отраженного от закрепленного на маятнике зеркала. Инерционная масса в прямом маятнике может вызвать заметные растягивающие напряжения в образце, что искажает результаты опытов. Тогда используют другую конструкцию – перевернутый крутильный маятник. Здесь нижний конец образца закрепляется неподвижно, а инерционная масса крепится к верхнему концу и поддерживается подвесом из материала с малым затуханием.

Экспериментальные установки для измерения внутреннего трения по схеме крутильного маятника – это сложные устройства. Блок-схема этих установок включает следующие основные элементы: 1) крутильный маятник; 2) систему механической коррекции; 3) демпфирующее устройство; 4) систему возбуждения и регистрации; 5) систему изменения момента инерции; 6) систему изменения и регулирования температуры; 7) вакуумную систему.

Рассмотренные константы упругих свойств и характеристики неупругости

имеют важное значение, хотя бы потому, что в реальных условиях эксплуатации большинство материалов в конструкциях работают в упругой области, не подвергаясь заметной пластической деформации. И все же большинство стандартных механических свойств характеризуют сопротивление пластической деформации или допустимую величину этой деформации. Упругие и неупругие свойства определяют в основном в металлофизических исследованиях, причем часто для того, чтобы разобраться в свойствах на стадии пластической деформации.

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 296 с.
4. Жуковец Н.И. Механические свойства металлов. – М.: Высшая школа, 1986. – 312 с.
5. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

Контрольные задания для СРС (темы 1, 2) [1], [2], [4], [12]

1. Приборы для определения упругих свойств. Принцип работы.
2. Упругие участки кривых напряжение – деформация.
3. Закон Гука для изотропных тел.
4. Внутреннее трение как метод исследования тонкой структуры металлов и сплавов.
5. Крутильный маятник.
6. Физический смысл логарифмического декремента затухания.
7. Механизм упругого последействия.
8. Резонансная установка для определения модуля нормальной упругости.

Раздел 4 Пластическая деформация

Тема 1 Механизмы пластической деформации (2 часа)

План лекции

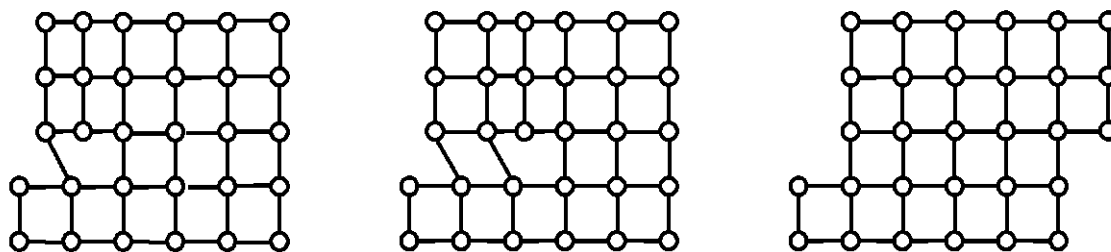
1. Пластическая деформация.
2. Механизмы пластической деформации.
3. Деформация скольжением.
4. Деформация двойникованием
5. Схема макроудлинения.
6. Влияние некоторых факторов на пластическую деформацию скольжением.

Механизмы пластической деформации.

Роль дислокаций в механизме пластической деформации

Пластическая деформация является результатом необратимых коллективных смещений атомов. В кристаллах эти смещения происходят путем движения дислокаций, что является атомным механизмом пластической деформации. Движение дислокаций может вызывать макропластическую деформацию образца путем либо *скольжения*, либо *двойникования*. Конечным итогом такого движения является сдвиг отдельных частей кристалла относительно друг друга или сдвиг и поворот атомных рядов в отдельных участках образца под некоторым углом к направлению сдвига.

В большинстве случаев металлы и сплавы *деформируются путем скольжения*. В элементарном виде механизм сдвига одной части кристалла относительно другой можно представить как результат пробега через него дислокации равной ширине кристалла (рисунок 8). Чем больше количество движущихся дислокаций и длиннее суммарный путь их перемещений, тем больше величина макропластической деформации.



а – краевая дислокация в кристалле; б – дислокация перемещена на одно межатомное расстояние в решетке; в – выход дислокации на поверхность и появление сдвига

Рисунок 8 – Схема сдвига верхней половины относительно нижней в результате пробега через него краевой дислокации

Величина относительного сдвига g равна:

$$g = \rho \cdot b \cdot l,$$

где ρ – плотность дислокаций;

b – вектор Бюргерса;

l – длина скольжения краевой дислокации.

Вектор Бюргерса – мера искажений решетки, обусловленных присутствием дислокаций.

В реальных металлах и сплавах, как правило, еще до начала деформации имеется много дислокаций разных типов. Под действием приложенных напряжений начинают работать различные их источники, порождающие новые дислокации. Движущиеся дислокации выходят на поверхность образца, взаимодействуют внутри него друг с другом: вступают в реакции, тормозятся, аннигилируют, образуют сплетения. Пластическая деформация определяется структурой, составом материала и условиями его деформации. Пластическую деформацию экспериментально изучают двумя методами: 1) микроскопическим анализом полированной поверхности образцов, на которой в результате деформации появляются особые “линии” и “полосы скольжения” и 2) методом дифракционной электронной микроскопии тонких фольг, вырезанных из

деформированных образцов.

Линии скольжения – это ступеньки, образующиеся на поверхности в результате выхода дислокаций. Когда, например, краевая дислокация выйдет на грань кристалла, то на поверхности этой грани образуется ступенька, равная по высоте h вектору Бюргерса дислокации. При этом длина ступени, т. е. линии скольжения, будет равна длине вышедшей на поверхность краевой дислокации (рисунок 9). Вышедшая одним концом на поверхность винтовая дислокация при своем движении также образует ступеньку, длина которой будет соответствовать длине пробега дислокации. Когда после скольжения в одной плоскости на поверхность выходит несколько дислокаций и высота ступеньки h достигает $\sim 10 \text{ \AA}$ и более, их можно наблюдать при электронном микроскопическом анализе реплик с предварительно отполированной поверхности деформированного образца. *Реплика* – тонкая, прозрачная для электронов пленка (например, угольная), наносимая на поверхность образца и очень точно копирующая ее рельеф. При просвечивании пучком электронов разные участки реплики, отличающиеся по толщине, дают разный контраст на изображении, благодаря чему можно наблюдать линии скольжения. После значительной деформации высота ступенек становится настолько большой, что их можно выявлять и под световым микроскопом.

Анализируя расположение линий скольжения, расстояние между ними, их высоту, можно составить не только качественное, но и количественное представление о величине пластической деформации. Зная кристаллографическую ориентировку анализируемой поверхности образца, по направлению линий скольжения определяют плоскости и направления скольжения. Перед деформацией с поверхности образца должна быть удалена окисная пленка, способная исказить картину распределения линий скольжения.

Метод дифракционной электронной микроскопии позволяет непосредственно наблюдать отдельные дислокации, определять их вектор Бюргерса и кристаллографию скольжения, оценивать характеристики дислокационной структуры на разных стадиях деформации.

Метод линий скольжения проще, особенно при использовании светового микроскопа. С его помощью изучают только структуру поверхности. С помощью этого метода было определено, что скольжение и сдвиги в кристаллах при низкотемпературной деформации идут вдоль определенных для каждого типа решетки кристаллографических плоскостей и направлений. Направление скольжения всегда лежит в своей плоскости скольжения. Их совокупность есть система скольжения. В металлах может действовать одна или несколько одновременно систем скольжения, однако все эти системы относятся обычно к одной – двум кристаллографическим ориентациям, характерным для каждого металла и определяемым типом его решетки.

Деформация двойникованием идет в тех случаях, когда скольжение по тем или иным причинам затруднено. Наиболее часто двойникование наблюдается при низких температурах и высоких скоростях деформации, особенно в металлах с г.ц.к.- и о.ц.к.-решетками. В чистых г.ц.к.-металлах деформация двойникованием происходит только при отрицательных температурах и

высоких скоростях деформации.

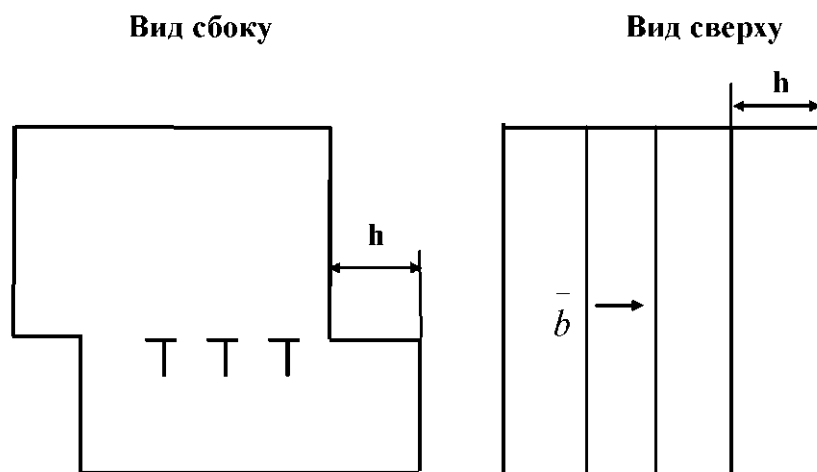


Рисунок 9 – Образование ступенек при выходе на поверхность краевых дислокаций

Схема макроудлинения образца при растяжении показана на рисунке 10. Видно, что при двойниковании происходит сдвиг одной части кристалла относительно другой вдоль определенной плоскости и направления двойникования. Плоскость двойникования – это обычно кристаллографическая плоскость с малыми индексами, которая является плоскостью симметрии двойникового образования относительно исходного кристалла.

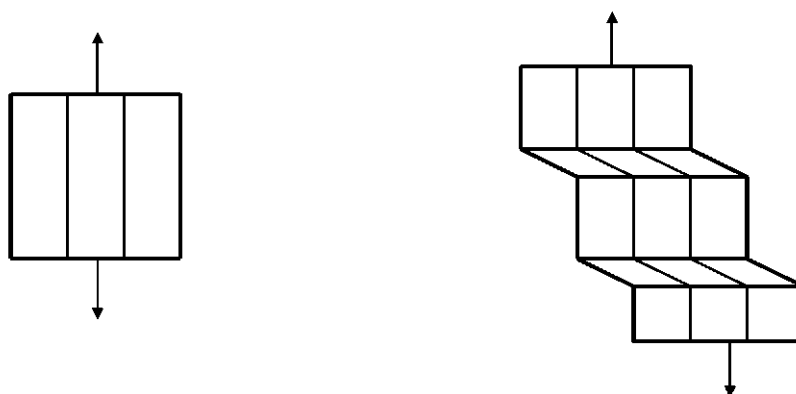


Рисунок 10 – Схема пластической деформации двойникованием

При металлографическом исследовании в световом и электронном микроскопах каждый двойник деформации выявляется в виде двух параллельных полос (следов его пересечения с поверхностью излома, шлифа или фольги). Специфичным для двойников деформации является очень малая ширина полос, (особенно в о.ц.к. металлах – меньше 5 мкм) и характерные сужения на концах. В поликристалле двойники никогда не переходят из одного кристалла в другой. Обычно они заканчиваются внутри зерна, а если доходят до границы, то возникающие в месте этого стыка напряжения могут способствовать появлению двойника в соседнем зерне, где он будет иметь иную ориентацию. Граница двойника обладает относительно низкой энергией и высокой устойчивостью, сохраняясь даже после высокотемпературного отжига.

Вероятность образования двойников в том или ином металле с одним типом решетки тем больше, чем меньше энергия упаковки.

Напряжения, необходимые для роста двойников, чаще всего значительно выше требуемых для скольжения. Поэтому деформация только двойникованием наблюдается редко. Обычно она начинается путем скольжения, а затем, по достижению определенного уровня напряжений, если дальнейшее скольжение затруднено. Иногда наоборот, если кристалл неблагоприятно ориентирован для базисного скольжения, его деформация начинается с двойникования. При этом ориентировка плоскостей скольжения может измениться таким образом, что в дальнейшем будет идти деформация скольжением.

Двойникование обычно не приводит к значительной остаточной деформации. Поэтому металлы, деформирующиеся только путем двойникования, малопластичны (например, висмут, сурьма).

Рассмотрим влияние некоторых факторов на картину пластической деформации скольжением. Увеличение энергии дефекта упаковки затрудняет расщепление дислокаций, уменьшает ширину полосы дефекта упаковки между частичными дислокациями. Это облегчает поперечное скольжение винтовых дислокаций. Чем больше энергия дефекта упаковки, тем раньше начнется интенсивное поперечное скольжение, дислокации легче обходят различные барьеры.

В результате пластическое течение осуществляется в основном в условиях интенсивно развитого поперечного скольжения. Высокую энергию дефекта упаковки имеет Al (г.ц.к.-решетка) и многие металлы с о.ц.к.-решеткой. Низкую – с г.ц.к.-решеткой (Cu, Ag, Au) (таблица 3).

Таблица 3 – Величина энергии упаковки γ чистых металлов

Тип кристаллической решетки	Металл	γ , эрг/см ² 1 эрг/см ² = =1 МДж/м ²	Тип кристаллической решетки	Металл	γ , эрг/см ² 1 эрг/см ² = =1 МДж/м ²		
Г. ц. к.	Ag Au Pb Cu Pt Ni Al	10...40 20...60 20...50 30...150 95...120 150...450 250	Г. п. у.	Zn	30...150 170...250 180		
				Mg			
				Re			
			О. ц. к.			V	100
						Ta	110
						α -Fe	140
	Cr	>300					
	Mo	>300					
	W	>300					

Помимо структуры металла (тип металла, ширина полосы дефекта, моноили поликристалл) на картине пластической деформации сильно сказываются условия, в которых проводится деформация.

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 296 с.
4. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. М.: Мир, 1972. – 408 с.
5. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

Контрольные задания для СРС (тема 1) [1], [2], [9]

1. Низкотемпературная пластическая деформация металлов скольжением.
2. Метод линий скольжения.
3. Метод дифракционной электронной микроскопии.
4. Стадии скольжения в монокристалле.
5. Влияние энергии дефекта упаковки на пластическую деформацию металлов скольжением.
6. Влияние схемы напряженного состояния на пластическую деформацию металлов скольжением.
7. Влияние температуры испытания на пластическую деформацию металлов скольжением.
8. Влияние скорости деформации на пластическую деформацию металлов скольжением.
9. Пластическая деформация металлов двойникованием.
10. Пластическая деформация твердых растворов и двухфазных сплавов.

Раздел 5 Деформационное упрочнение материалов

Тема 1 Деформационное упрочнение. Влияние различных факторов на структуру и свойства деформированных металлов (2 часа)

План лекции

1. Деформационное упрочнение металлов.
2. Коэффициент деформационного упрочнения.
3. Условия деформационного упрочнения.
4. Влияние нагрева на структуру и свойства деформированного металла.
5. Причины расхождения кривых S – e при разных температурах.
6. Влияние легирования и примесей на вид кривых напряжения.
7. Сверхпластичность.

Деформационное упрочнение металлов

Для непрерывного продолжения деформации образца требуется постоянное увеличение действующих на него напряжений. Это явление называется *деформационным упрочнением*. После предварительной холодной деформации прочностные характеристики материала повышаются (наклёп). Деформационное упрочнение обусловлено торможением дислокаций. Чем

труднее перемещаться дислокациям в материале, тем больше коэффициент (модуль) деформационного упрочнения – производная напряжения по деформации. Для строгого анализа закономерностей деформационного упрочнения необходимо пользоваться кривыми в координатах истинное напряжение (S или t) – деформация (e или g). Поскольку пластическая деформация скольжением в металлах осуществляется за счёт движения дислокаций в определённых плоскостях под действием касательных напряжений, более правильно строить кривые $t - g$. Приведённое напряжение сдвига:

$$t_{\pi} = S \cdot \cos\theta \cdot \cos\gamma,$$

где θ – угол между нормалью к плоскости скольжения и осью растяжения;

γ – угол между направлением скольжения и осью растяжения.

Когда ось растяжения перпендикулярна плоскости скольжения ($\gamma=90^{\circ}$) или параллельна ей ($\theta=90^{\circ}$), то $t_{\pi}=0$. t_{\max} получается, если $\theta=\gamma=45^{\circ}$.

Приведённая деформация сдвига определяется по формуле:

$$g_{\pi} = (\cos\theta_0)^{-1} \{ [(l_k/l_0)^2 - \sin^2\gamma_0]^{1/2} - \cos\gamma_0 \},$$

где θ_0 и γ_0 – величина θ и γ в начальный момент деформации;

l_k и l_0 – начальная и конечная (в любой момент испытания) расчётная длина образца.

Влияние нагрева на структуру и свойства деформированного металла

Основные эффекты этого влияния в области температур до начала интенсивного термического возврата показаны на примере трехстадийной кривой растяжения монокристаллов никеля – рисунок 11. Видно, что нагрев при испытании в низкотемпературной области приводит к снижению уровня напряжений течения, сокращению первых двух стадий упрочнения и расширению третьей, уменьшению коэффициента деформационного упрочнения на этой третьей стадии.

Наиболее важным результатом повышения температуры для поликристаллов является снижение коэффициента упрочнения на 3 стадии из-за облегчения поперечного скольжения (на 1 и 2 стадиях dt/dg) также снижается из-за уменьшения модуля сдвига, но эффект очень невелик. Это приводит к тому, что кривые растяжения поликристаллов при разных температурах могут заметно различаться по степени деформационного упрочнения и уровню напряжений течения (рисунок 11).

Чем легче идет поперечное скольжение при самых низких температурах, тем меньше влияние нагрева на dS/de . Например, повышение температуры испытания о.ц.к. металлов с высокой энергией дефекта упаковки слабо сказывается на коэффициенте упрочнения, кривые здесь отличаются в основном уровнем напряжений.

В общем случае расхождение кривых $S e$ при разных температурах, (например, на рисунке 12, а), обусловлено двумя разными причинами: 1) различием субструктур, возникающих при разных температурных испытаниях и 2) зависимостью напряжения течения (при одинаковой субструктуре) от температуры. Предположим, что действует только вторая причина. Тогда, если

после прекращения деформации при T_2 в точке B мгновенно снизить температуру до T_1 , то напряжение течения скачком повысится до значения D и при дальнейшей деформации кривая пойдет так же, как будто мы с самого начала растягивали образец при T_1 .

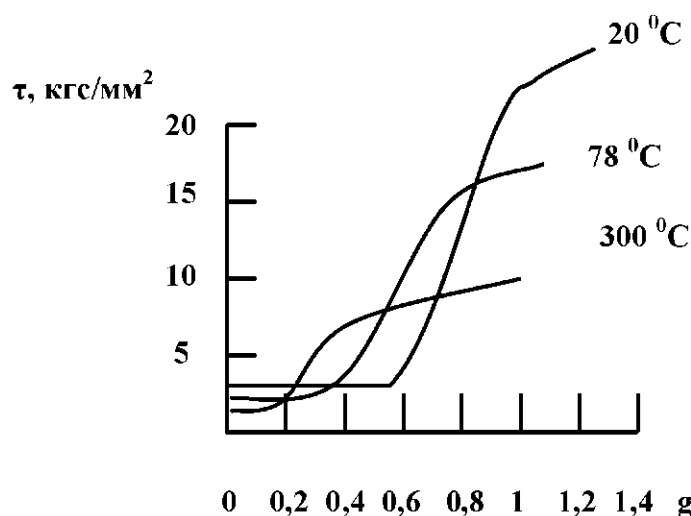


Рисунок 11 – Кривые деформационного упрочнения монокристаллов никеля при разных температурах

Предположим теперь, что расхождение кривых на рисунке 12, а связано только с разницей в субструктурах. В этом случае после снижения температуры от T_2 до T_1 в точке B изменится только наклон кривой: дальнейшему растяжению при T_1 соответствует пунктир BK , причем кривая BK не параллельна кривой ODE , так как “исходные” субструктуры в точках B и D разные.

Ясно, что при действии обеих рассматриваемых причин мы будем иметь какой-то промежуточный вариант (CL на рисунке 12, а). Относительный вклад каждой из причин количественно оценивается отношением $\frac{S_C / S_D}{S_B / S_B}$, которое

можно определить экспериментально. Чем ближе это отношение к единице, тем более значительно влияние температурной зависимости напряжения течения.

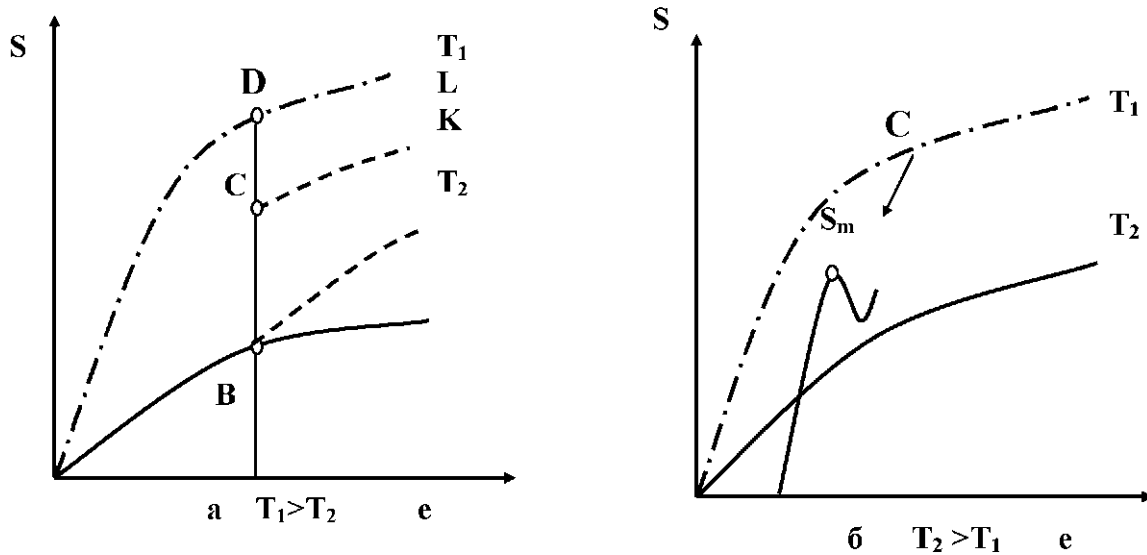
Однако эксперименты показывают, что для чистых металлов температурная зависимость сопротивления деформации незначительна, и главной причиной влияния температуры на напряжение течения и коэффициент упрочнения является разница в субструктурах, формирующихся при разных температурах испытания. У алюминия и меди, в частности, отношение $\frac{S_C}{S_B}$

близко к единице (1,1...1,4), а $\frac{S_C / S_D}{S_B / S_B} = 0,5...0,67$.

При этом для г.ц.к.- и г.п.у.-металлов действует установленная Коттреллом и Стоксом закономерность

$$\frac{\Delta S}{S} = \text{const},$$

где ΔS – изменение напряжения течения, вызванное мгновенным изменением температуры в процессе деформации (с постоянной скоростью), равное $S_c - S_B$; S – начальное (S_B) или конечное (S_C) напряжение.



а – снижение температуры; б – повышение температуры

Рисунок 12 – Влияние изменения температуры испытания на кривые деформационного упрочнения

Влияние легирования и примесей на вид кривых напряжения

Знание этих особенностей пластической деформации твердых растворов и гетерофазных сплавов позволяет предсказать и объяснить основные эффекты воздействия легирования на деформационное упрочнение.

Примеси в технических металлах и малые количества легирующих элементов, входящих в твердый раствор, оказывают влияние на вид кривых растяжения в основном через образование примесных атмосфер на дислокациях. Влияние это проявляется, как правило, на начальных этапах пластической деформации.

Отличия деформационного упрочнения концентрированных твердых растворов от чистых металлов наиболее полно можно выявить, сопоставив соответствующие кривые монокристаллов, благоприятно ориентированных для одиночного скольжения. На рисунке 13 такое сопоставление сделано на примере никеля и его сплавов – твердых растворов с кобальтом. В целом характер кривых остается аналогичным, что свидетельствует об идентичности процессов, определяющих упрочнение чистых металлов и твердых растворов. В то же время видно, что растворение легирующего элемента вызывает прогрессирующее: а) повышение критического напряжения сдвига; б) удлинение стадии легкого скольжения; в) повышение напряжений перехода ко 2 и особенно к 3 стадиям; г) увеличение коэффициента деформационного

упрочнения на 3 стадии. Рост критического напряжения сдвига обусловлен увеличением сил трения при движении дислокаций в решетке с наличием инородных атомов. Увеличение протяженности первой стадии при легировании – результат затруднения начала скольжения в новых плоскостях: если критическое напряжение сдвига возрастает, то концентрация напряжений у скоплений дислокаций в твердом растворе, необходимая для инициирования скольжения в новых плоскостях, тоже растет и, следовательно, легкое скольжение может продолжаться до больших деформаций.

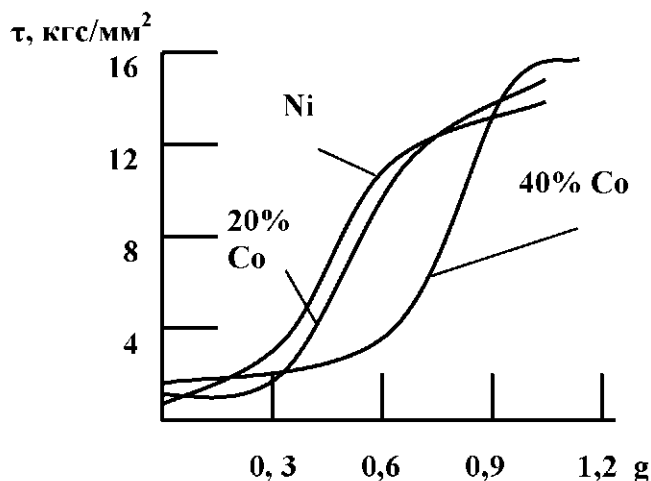


Рисунок 13 – Кривые деформационного упрочнения никеля и твердых растворов кобальта в никеле при 295 К

Особенно важным является повышение напряжения перехода к третьей стадии и увеличение здесь коэффициента упрочнения. Это связано с затруднением в результате легирования поперечного скольжения дислокаций (из-за увеличения сил трения), упорядочения и, очень часто, уменьшения энергии дефекта упаковки. В результате коэффициент деформационного упрочнения и уровень напряжений течения поликристаллических сплавов – твердых растворов оказываются более высокими, чем чистого металла.

Количественно разница в деформационном упрочнении чистого металла и твердого раствора колеблется в широких пределах и определяется типом решетки и различием таких параметров, как энергия дефекта упаковки, размерное и электрохимическое несоответствие атомов растворителя и добавки (оно определяет степень искажения решетки и прирост силы трения при легировании), степень порядка и др.

Например, при комнатной температуре коэффициент упрочнения г.ц.к. поликристаллов Ni_3Fe , Cu_3Au и Au_3Cu с упорядоченной структурой примерно в два раза больше, чем в отсутствие дальнего порядка. В то же время упорядочение сплавов с о.ц.к.- и г.п.у.- решетками весьма слабо сказывается на деформационном упрочнении. Ясно, что увеличение разницы в энергиях дефекта упаковки сплава и исходного металла, а также степени атомного несоответствия легирующего элемента и основы при прочих равных условиях усиливает различия в деформационном упрочнении. Чем ниже температура испытания, тем более значительны эти различия твердых растворов и чистых

металлов. Однако если они обусловлены упорядочением, то влияние температуры становится неоднозначным: пока с повышением температуры степень порядка растет, разница в деформационном упрочнении увеличивается, и наоборот.

Легирующие элементы, вызывающие образование избыточных фаз, усиливает деформационное упрочнение с самого начала пластического течения. При наличии достаточно большого количества дисперсных выделений стадия легкого скольжения может быть полностью подавлена, и кривая упрочнения монокристалла оказывается по виду такой же, как у поликристалла.

По мере деформации таких сплавов степень упрочнения может даже на начальных этапах возрастать за счет образования дислокационных петель между частицами и соответствующего уменьшения “эффективного” расстояния между ними. Частицы второй фазы затрудняют как консервативное скольжение дислокаций, так и неконсервативное их движение – поперечное скольжение и переползание. Поэтому они способствуют увеличению коэффициента упрочнения и росту напряжений течения на всех стадиях деформации и практически при всех температурах (хотя, конечно, с повышением температуры их упрочняющее действие ослабляется).

Как известно, в процессе пластической деформации резко увеличивается концентрация точечных дефектов, в первую очередь, вакансий. Это приводит к ускорению диффузионных процессов при испытании. В технических сплавах ускорение диффузии в процессе испытания проявляется особенно часто и имеет важное значение. Это относится в первую очередь к тем сплавам, в которых возможны диффузионные фазовые превращения. Последние, особенно при повышенных температурах испытания, могут вызывать различные аномалии в ходе кривых упрочнения. Например, в стареющих сплавах повышение температуры в определенном диапазоне может вызывать не снижение, а повышение уровня напряжений течения и коэффициента деформационного упрочнения однофазного до испытания материала.

В металлах и сплавах с высокодисперсной структурой одновременное воздействие напряжений и повышенных температур вызывает уже упоминавшийся эффект *сверхпластичности*. Типичный пример – монотектоидный сплав цинка с 22 % Al, на котором было открыто А.А. Бочваром и З.А. Свидерской явление сверхпластичности цинкалюминиевых сплавов.

При температурах 473...543 К и определенном интервале скоростей растяжения образцы этого сплава проявляют все признаки сверхпластической деформации. Помимо большого удлинения ($10^2 \dots 10^3$ %) для такой деформации характерны очень низкие напряжения течения, плавно снижающиеся на большей части кривой растяжения. Такое аномальное разупрочнение обусловлено существенным снижением скорости деформации в процессе испытания с постоянной скоростью деформирования (чем больше длина образца, тем меньшему относительному удлинению соответствует то же абсолютное удлинение и меньше скорость деформации). В результате замедления деформации полнее успевают проходить термически активируемые

процессы в приграничных зонах, легче идет межзеренная деформация и напряжение течения снижается.

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

Контрольные задания для СРС (тема 1) [1], [2], [9]

1. Деформационное упрочнение.
2. Сверхпластичность. Материалы. Условия сверхпластичности.
3. Влияние температуры на свойства деформированного металла.
4. Влияние легирования на свойства деформированного металла.
5. Влияние примесей на свойства деформированного металла.

Раздел 6 Механические свойства, определяемые при статических испытаниях

Тема 1 Испытания на растяжение и характерные точки диаграммы растяжения (2 часа)

План лекции

1. Испытания на одноосное растяжение.
2. Прочностные свойства.
3. Стандартные образцы для испытаний на растяжение.
4. Разновидности первичных диаграмм растяжения.
5. Предел пропорциональности.
6. Предел текучести.
7. Предел прочности.

Испытания на растяжение и характерные точки диаграммы растяжения

В большинстве случаев металлические материалы в конструкциях работают под статическими нагрузками. Поэтому статические испытания широко распространены и проводятся с использованием разных схем напряженного состояния в образце. К основным разновидностям статических испытаний относятся испытания на растяжение, сжатие, изгиб и кручение.

Испытания на одноосное растяжение – наиболее распространенный вид испытаний для оценки механических металлов. Методы испытания на растяжение стандартизированы. Помимо основной рабочей части большинство образцов (рисунок 17) имеет головки различной конфигурации для крепления в захватах.

Механические свойства при растяжении могут быть разделены на две группы – прочностные и пластические. *Прочностные свойства* – это

характеристики сопротивления материала образца деформации или разрушению. Большинство стандартных прочностных характеристик рассчитывают по положению определенных точек на диаграмме растяжения, в виде условных растягивающих напряжений. На практике механические свойства определяют по первичным кривым растяжения в координатах *нагрузка – абсолютное удлинение*, которые автоматически записываются на диаграммной ленте испытательной машины. Для поликристаллов различных металлов все многообразие этих кривых можно свести к трем типам (рисунок 18).

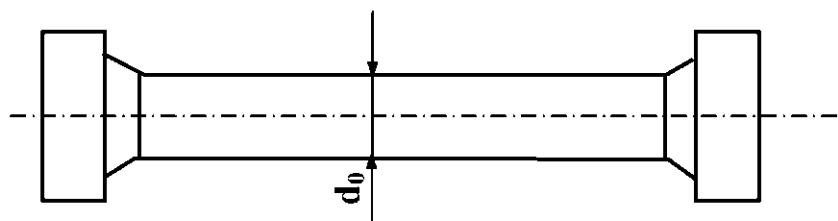
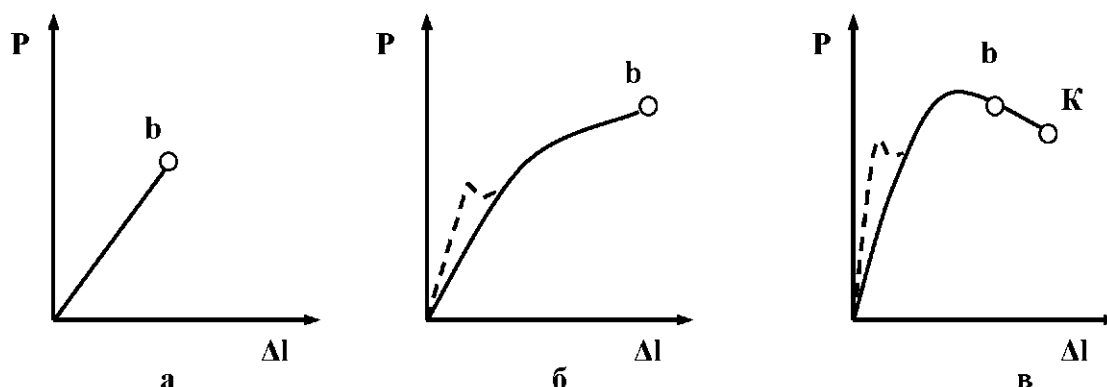


Рисунок 17 – Стандартный образец для испытаний на растяжение

В зависимости от типа диаграммы меняется набор характеристик, которые по ней можно рассчитать, а также их физический смысл. На рисунке 19 (диаграмма третьего типа) нанесены характерные точки, по ординатам которых рассчитывают прочностные характеристики ($\sigma_i = P_i/F_0$). Как видно, на диаграммах других двух типов могут быть нанесены не все эти точки.



а) хрупкое разрушение; б) разрушение после равномерной деформации;
в) разрушение после образования шейки

Рисунок 18 – Разновидности первичных диаграмм растяжения

Усилие $P_{мп}$ определяет величину *предела пропорциональности* $\sigma_{мп}$ – напряжения, которое материал образца выдерживает без отклонения от закона Гука ($\sigma_{мп} = P_{мп}/F_0$).

Усилие $P_{упр}$ определяет величину *условного предела упругости* $\sigma_{упр}$ – напряжения, при котором остаточное удлинение достигает заданной величины, обычно 0,05%. Иногда меньше – до 0,005%. Это напряжение, при котором появляются первые признаки микропластической деформации ($\sigma_{упр} = P_{упр}/F_0$).

Усилие P_T определяет величину *физического предела текучести* σ_T – напряжения, при котором остаточное удлинение достигает заданной величины,

обычно 0,2%. Иногда 0,1%; 0,3% и больше. Это напряжение, при котором образец деформируется под действием практически неизменной растягивающей нагрузки ($\sigma_T - P_T/F_0$). Физический предел часто называют нижним в отличие от верхнего предела текучести, рассчитываемого по нагрузке, соответствующего вершине зуба текучести и на рисунке 19.

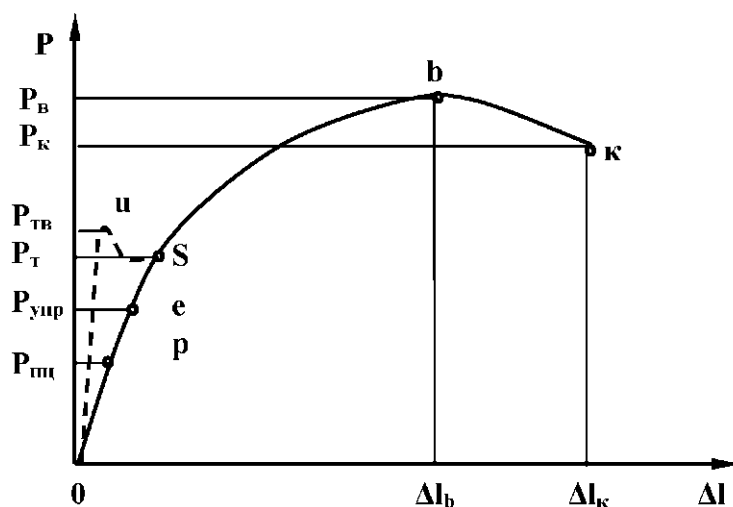


Рисунок 19 – Характерные точки на диаграмме растяжения, по которым рассчитывают прочностные характеристики

Усилие P_e определяет величину *предела прочности* σ_e – условного напряжения, характеризующего сопротивление максимальной равномерной деформации ($\sigma_e - P_e/F_0$).

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 296 с.
4. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

Тема 2 Испытания на сжатие (2 часа)

План лекции

1. Относительное укорочение и относительное уширение.
2. Схема испытания на сжатие.
3. Геометрия образцов при испытаниях на сжатие.
4. Способы уменьшения силы трения на опорных поверхностях образца.
5. Схемы разрушения при испытаниях на сжатие.
6. Методика определения прочностных свойств по диаграмме сжатия.
7. Истинное напряжение сжатия.

Испытания на сжатие. Схемы разрушения при сжатии

Схема одноосного сжатия характеризуется большим коэффициентом мягкости ($\alpha=2$). Поэтому испытаниям на сжатие целесообразно подвергать относительно хрупкие материалы. В целом испытания на сжатие распространены гораздо меньше, чем на растяжение.

Одноосное сжатие можно рассматривать как растяжение с обратным знаком. В результате пластической деформации образец укорачивается и уширяется. Следовательно, можно определять относительное укорочение:

$$\varepsilon = 100\% \cdot (h_0 - h_k) / h_0$$

и относительное уширение:

$$\varphi = 100\% \cdot (F_k - F_0) / F_0,$$

где h_0 и h_k – начальная и конечная высота образца;

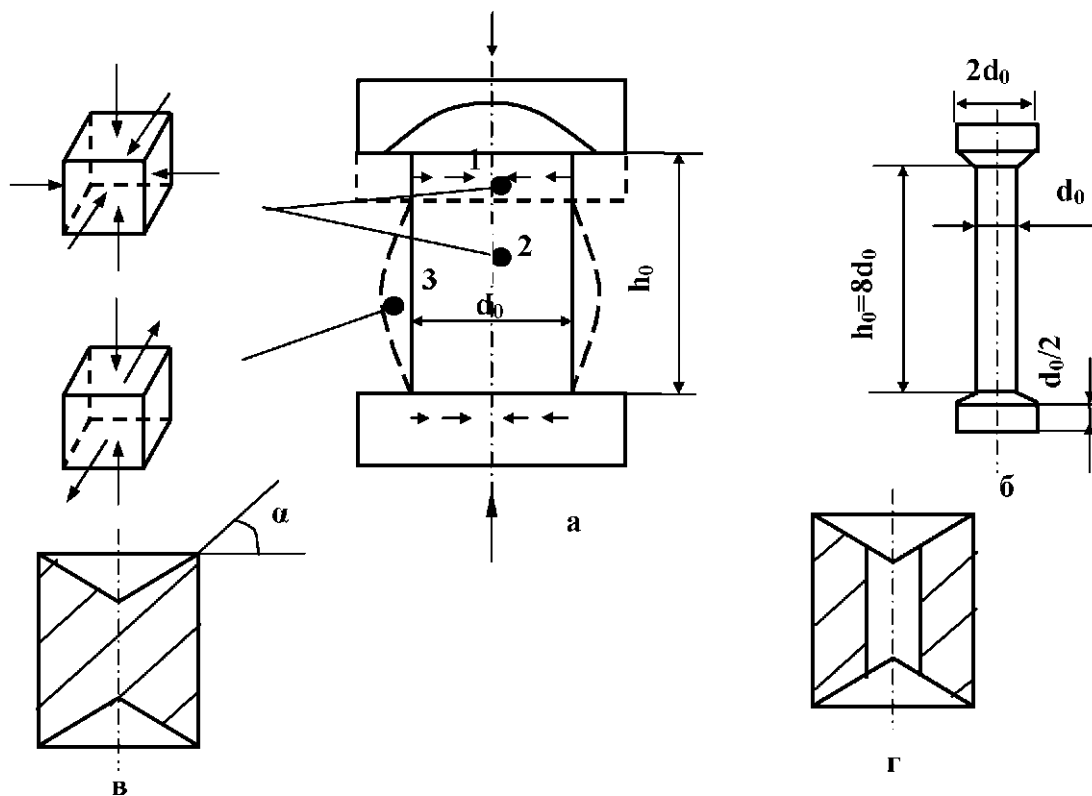
F_0 и F_k – начальная и конечная площади поперечного сечения.

Схема испытания на сжатие и геометрия используемых образцов показаны на рисунке 20. Испытания на сжатие проводят на тех же машинах, на которых ведутся испытания на растяжение. Образец устанавливают на опорную плиту в нижнем захвате и сжимают подвижным захватом. Для устранения перекоса образца усилие сжатия следует передавать на него с помощью какого-либо направляющего приспособления, например, шарового вкладыша в верхнем захвате.

По мере сжатия на торцевых поверхностях образца возникают силы трения, направленные по радиусам к его центру и препятствующие деформации в горизонтальном направлении. В результате образец приобретает характерную бочкообразную форму, а схема напряженного состояния усложняется и становится различной в разных точках образца. В точках 1 и 2 возникает схема объемного сжатия, а в точке 3 – равноименное плоское напряженное состояние. Неоднородность напряженного состояния учесть крайне трудно и на практике ее игнорируют. Поэтому стараются уменьшить силы трения на опорных поверхностях образца. Для этого вводят смазки (вазелин, солидол); прокладки – (тефлон) – между торцовыми поверхностями образца и опорными плитами. Используют образцы с коническими поверхностями на торцах. При этом угол конусности α подбирают так, чтобы $\operatorname{tg} \alpha$ был равен коэффициенту трения. Помимо конусности, в образце делают отверстие, устраняющее концентрацию напряжений у острия конуса.

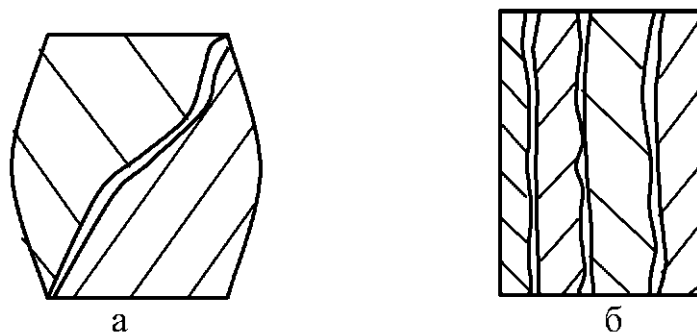
Но полностью устранить контактные силы трения не удастся. Это принципиальный недостаток испытаний на сжатие. Оптимальная для цилиндрических образцов величина отношения h_0/d_0 лежит в пределах 1...3.

Характер разрушения сжимаемых образцов зависит от величины контактных сил трения. Если они велики, то наблюдается разрушение путем среза (рисунок 21, а). Если они незначительны, то фиксируется разрушение отрывом (рисунок 21, б).



а – схема; б, в, г – виды образцов

Рисунок 20 – Схема испытания на сжатие и формы испытания образцов



а – срез; б – отрыв

Рисунок 21 – Схемы разрушения при испытаниях на сжатие

По диаграмме сжатия определяют условные пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочности. Методика определения прочностных свойств по диаграмме сжатия аналогична методике для растяжения.

$$\varepsilon = \varphi / l + \varphi.$$

Отсюда, учитывая правило постоянства объема образца в процессе пластической деформации, можно перестроить первичную диаграмму сжатия.

$$V = F_0 h_0 = F h = const,$$

$$F = F_0 h_0 / h = F_0 / (1 - \varepsilon).$$

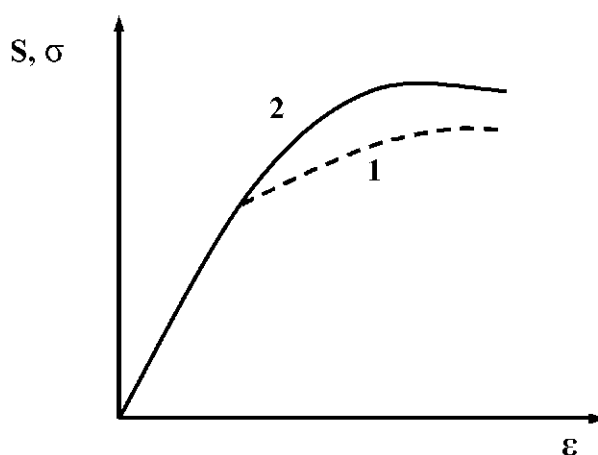
здесь F – площадь поперечного сечения образца.

$$F/F_0 = 1/(1 - \varepsilon),$$

$$\varphi = F - F_0/F_0 = (F/F_0) - 1 = (1/(1 - \varepsilon)) - 1 = \varepsilon/(1 - \varepsilon),$$

Отсюда видно, что при сжатии, в противоположность растяжению, $S < \sigma$, так как $F > F_0$. Диаграммы истинных напряжений обычно строят в координатах $S - \varepsilon$ (рисунок 22, кривая 1), хотя в качестве меры деформации можно использовать истинное относительное сжатие:

$$e_{сж} = \ln(h_0/h).$$



1 – истинные напряжения; 2 – условные напряжения

Рисунок 22 – Диаграмма напряжений при сжатии

На рисунке 22 нанесена и кривая условных напряжений (кривая 2), которая при сжатии всегда имеет вид, качественно аналогичный диаграмме истинных напряжений, поскольку на первичной диаграмме нет максимума и участка снижения нагрузки.

Истинное напряжение сжатия:

$$S = P/F = P(1 - \varepsilon)/F_0 = \sigma \cdot (1 - \varepsilon) = \sigma \cdot (1/(1 + \psi)).$$

Важной особенностью при сжатии является увеличение площади сечения образца в процессе испытания. Это увеличивает скорость прироста нагрузки на первичных диаграммах сжатия.

Величина прочностных характеристик при сжатии, особенно предела прочности, значительно выше, чем при растяжении. Схемы сжатия используют в технологических пробах для оценки деформационной способности полуфабрикатов и изделий.

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 296 с.
4. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

Тема 3 Испытания на изгиб и кручение (2 часа)

План лекции

1. Схемы нагружения образца при испытаниях на изгиб.
2. Неоднородное напряженное состояние в изгибаемом образце.
3. Образцы для испытаний на изгиб.
4. Диаграмма изгиба.
5. Графические методы определения прочностных свойств по диаграмме изгиба.
6. Испытания на кручения.
7. Диаграмма кручения.

Испытания на изгиб. Диаграмма изгиба.

Применение испытаний на изгиб обусловлено широкой распространенностью этой схемы нагружения в реальных условиях эксплуатации и большей ее мягкости по сравнению с растяжением, что дает возможность оценивать свойства материалов, хрупко разрушающихся при растяжении. Испытания на изгиб удобны для оценки температур перехода из хрупкого состояния в пластическое (например, у хладноломких о.ц.к.-металлов и интерметаллидов).

При испытаниях на изгиб применяют две схемы нагружения образца, лежащего на неподвижных опорах: 1) нагрузка прикладывается сосредоточенной силой на середине расстояния между опорами и 2) нагрузка прикладывается в двух точках на одинаковом расстоянии от опор. Первая схема нашла большее распространение из-за простоты. Следует учитывать, что вторая схема во многих случаях обеспечивает более надежные результаты, поскольку здесь максимальный изгибающий момент возникает на определенном участке длины образца, а не в одном сечении как при использовании первой схемы.

В изгибаемом образце создается неоднородное напряженное состояние. Нижняя часть образца оказывается растянутой, верхняя – сжатой. Напряжения, связанные с величиной изгибающего момента, различны по длине и сечению образца.

Образцы для испытаний на изгиб не имеют головок. Для изгиба используют прямоугольные или цилиндрические стержни. Для оценки характеристик конструктивной прочности рекомендуется применять образцы большого сечения – 30×30 мм.

Испытания на изгиб можно проводить на любой испытательной машине, используемой для испытаний на растяжение. Образец устанавливают на опорную плиту в нижнем захвате и деформируют изгибающим ножом, который крепят в верхнем захвате машины. Изгиб достигается путем опускания верхнего или подъема нижнего захвата. При этом может быть записана диаграмма изгиба в координатах нагрузка P – стрела прогиба f . Для пластичного материала диаграмма изгиба выглядит, как на рисунке 23. Если материал хрупкий, то кривая обрывается в точке b .

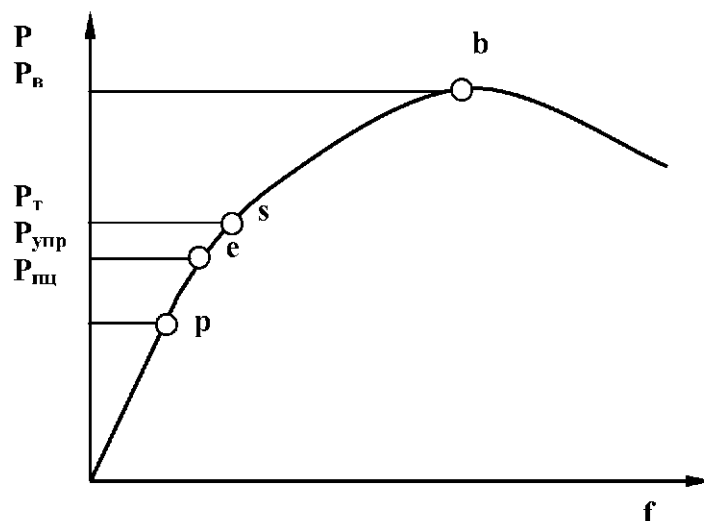


Рисунок 23 – Диаграмма изгиба

Знание величины нагрузок $P_{пл}$, $P_{упр}$, P_t , P_v позволяет определять пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочности при изгибе. Напряжения на стадии упругой деформации обычно рассчитывают по обычным формулам сопротивления материалов.

Условное нормальное напряжение в крайнем растянутом волокне

$$\sigma = M/W,$$

где M – изгибающий момент. В случае нагружения сосредоточенной силой:

$$M = Pl/4;$$

W – момент сопротивления сечения. Для прямоугольного образца.

$$W = bh^2/6,$$

а для цилиндрического

$$W = \pi d^3/32.$$

Рабочей формулой для расчета упругих напряжений при изгибе образцов прямоугольного сечения является

$$\sigma = 3 \cdot P \cdot l / 2 \cdot b \cdot h^2,$$

а для цилиндрических образцов

$$\sigma = 8P \cdot l / \pi d^3.$$

Эти формулы часто используют для расчета всех прочностных характеристик при изгибе. Но достаточно точные результаты получают только при определении пределов упругости и пропорциональности.

Графические методы определения прочностных свойств по диаграмме изгиба аналогичны применяемым при растяжении. Допуски и величину деформации при определении предела пропорциональности σ_{mp} , предела упругости $\sigma_{0,05}$, предела текучести $\sigma_{0,2}$ задаются по величине стрелы прогиба, которая связана с относительным удлинением крайнего растянутого волокна в изогнутом образце. Для прямоугольного стержня:

$$f = l^2 \cdot \delta / 6 \cdot h.$$

Отсюда, при определении условного предела текучести допуск на остаточный прогиб $f_{0,2}$, соответствующий удлинению крайнего волокна на 0,2% будет

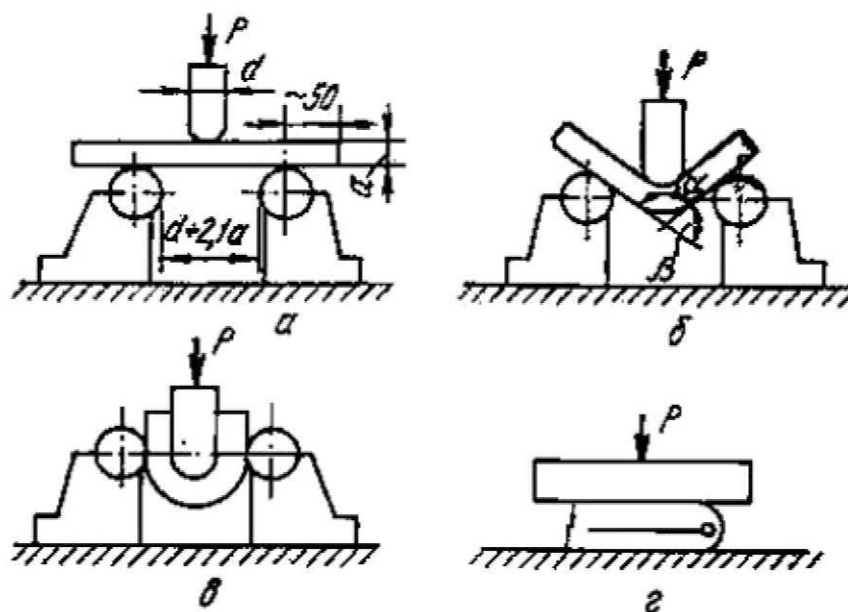
$$f_{0,2} = 0,002 \cdot l^2 / b \cdot h.$$

При испытаниях на изгиб достаточно пластичные материалы не разрушаются. Образец при этом загибается вплоть до параллельности его частей, расположенных по обе стороны от его ножа (рисунок 24, в). Материалы, которые разрушаются при изгибе, могут предварительно деформироваться на разную величину. Разрушение может произойти в любой точке диаграммы изгиба (рисунок 23). У пластически деформирующихся образцов точка максимума b на диаграмме часто совпадает с появлением первой трещины. Иногда образование трещин сопровождается резкими спадами нагрузки на правой ветви диаграммы изгиба (штрихпунктир на рисунке 23).

В качестве характеристики пластичности при изгибе помимо f часто используют угол загиба β дополнительным до 180° к углу изгиба α (рисунок 24). Угол β возрастает по мере повышения деформационной способности материала, а угол α уменьшается.

В заводских условиях применяют технологические пробы, задача которых – оценить пластичность деформированных полуфабрикатов, отливок и изделий (листов, труб, проволоки). Критерием годности продукции может быть заданный угол загиба образцов β (рисунок 24, б); появление первой трещины после загиба на угол β , равный или больше заданного; возможность загиба пластины до параллельности (рисунок 24, в) или соприкосновения сторон (рисунок 24, г).

Существуют также пробы на перегиб листа, ленты и проволоки, в которых фиксируют заданное число перегибов либо количество перегибов, после которых появились трещины, либо образец разрушился.



а – образец перед испытанием, б – загиб до определенного угла,
в – загиб до параллельности сторон, г – загиб до соприкосновения сторон

Рисунок 24 – Технологическая проба на изгиб

Испытания на кручение. Диаграмма кручения

Кручение осуществляют двумя равными по величине и противоположно направленными крутящими моментами, которые прикладываются к концам образца в плоскостях, нормальных к его продольной оси. В рабочей части образца возникает разноименное плоское напряженное состояние с коэффициентом мягкости $\alpha=0,8$ (большее, чем при растяжении). При испытании на кручение до разрушения можно довести любой материал.

Максимальные касательные напряжения при кручении действуют в плоскостях, перпендикулярных оси образца. Наибольшие нормальные напряжения действуют под углом 45° , причем $S_{max}=t_{max}$. Важным следствием неизменности напряженного состояния является постоянство рабочей длины и поперечного сечения образца во время испытания.

Методика испытаний образцов из любых материалов диаметром не менее 5 мм стандартизирована. Образцы должны иметь цилиндрическую рабочую часть и квадратные головки. Образец с диаметром рабочей части 10 мм и длиной 50 или 100 мм принят за нормальный. Допускается использование геометрически подобных нормальному образцов, а также трубчатых.

Испытания на кручение проводятся на специальных машинах, которые должны обеспечивать надежную центровку образца, плавность нагружения и отсутствие изгибающих усилий, возможность достаточно точного задания и измерения величины крутящего момента. Используются машины с горизонтальным и вертикальным расположением образца. Максимальный крутящий момент меняется от 6 до 200000 кгс·м. Основные узлы этих машин – станина, привод, от которого вращается активный захват, силоизмеритель, диаграммный механизм, счетчик оборотов и угломер для определения угла закручивания образца.

В качестве меры деформации в процессе испытания фиксируется угол закручивания φ . Для точного измерения этого угла используют зеркальный прибор Мартенса или другой тензомер с большой точностью. Два зеркала крепятся на границах расчетной длины образца. Напротив каждого из зеркал устанавливают шкалы и зрительные трубы, с помощью которых фиксируют отраженные в зеркалах показания шкалы.

В процессе испытания каждый захват машины поворачивается на определенный угол (большой у активного захвата). Угол закручивания образца равен разности этих углов. Однако он включает паразитные деформации зажимов и головок образца. Для их исключения угол закручивания определяют по расчетной длине l_0 , помещая зеркала на некотором расстоянии от головок:

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2.$$

В области малых углов

$$\operatorname{tg} 2\varphi_1 \approx 2\varphi_1 = a_1 - a_2 / L,$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi_2 \approx 2\varphi_2 = b_1 - b_2 / L,$$

где a_1, a_2 – отсчеты по шкалам после закручивания; $b_1 - b_2$ – начальные отсчеты.

Тогда угол закручивания

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = (a_1 - a_2) - (b_1 - b_2) / 2 \cdot L = \Delta / 2 \cdot L.$$

Зная значения крутящего момента и угла закручивания, можно построить диаграмму кручения в координатах $M_{кр} - \varphi$. Эта диаграмма состоит из участка упругой (Op) и пластической деформации ($pк$). Из-за отсутствия значительного местного сужения ниспадающего участка на диаграмме кручения не бывает. Условные пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочности, а также истинный предел прочности выражаются через касательные напряжения.

Истинный предел прочности определяют по формуле, учитывающей поправку на пластическую деформацию:

$$t_k = \frac{4}{\pi \cdot d^3} \left(3 \cdot M_{кр} + \theta \cdot \frac{dM_{кр}}{d\theta} \right),$$

где $M_{кр}$ – наибольший крутящий момент, предшествующий разрушению образца;

θ – удельный угол закручивания перед разрушением (в радианах на 1 мм):

$$\theta = \varphi_1 - \varphi_2 / l_0.$$

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.

3. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 296 с.

4. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

Контрольные задания для СРС (темы 1, 2, 3) [1], [2], [4], [5], [12]

1. Машины для испытаний на растяжение. Схемы испытательных машин.
2. Силоизмерители в машинах для испытаний на растяжение.
3. Схемы испытаний на растяжение при повышенных и отрицательных температурах.
4. Деформационное упрочнение металлических монокристаллов.
5. Деформационное упрочнение поликристаллов.
6. Влияние различных факторов на деформационное упрочнение.
7. Испытания на двухосное растяжение методом выдавливания.
8. Твердорастворное упрочнение.
9. Влияние выделений избыточных фаз.
10. Меры борьбы с трением на опорных поверхностях образцов при испытаниях на сжатие.
11. Схемы напряженного состояния в образце при испытаниях на изгиб.
12. Графические методы определения прочностных свойств по диаграмме изгиба.
13. Машины для испытаний на изгиб.
14. Характеристики пластичности при изгибе.
15. Особенности испытаний на кручение.
16. Машины для испытаний на кручение.
17. Характеристик диаграммы кручения.
18. Определение условных пределов пропорциональности, текучести, упругости и прочности.

Раздел 7 Механические свойства, определяемые при динамических испытаниях

Тема 1 Ударная вязкость (2 часа)

План лекции

1. Основные образцы при динамических испытаниях.
2. Схема ударного изгиба на маятниковом копре.
3. Величина работы деформации и разрушения.
4. Ударная вязкость.
5. Способы повышения точности результатов динамических испытаний.
6. Схемы объемного растяжения.

Динамические испытания на изгиб образцов с надрезом

При динамических испытаниях закон подобия не действует. Здесь необходима жесткая унификация образцов. Основным образцом служит стержень с квадратным сечением 10×10 мм и длиной 55 мм (рисунок 14). Надрез наносится по середине длины. Он имеет ширину и глубину 2 мм и

радиус закругления 1 мм. Возможно применение образцов той же длины и сечения, но с более глубокими надрезами (до 5 мм). Расстояние между опорами должно быть 40 мм. Изгибающий нож имеет сечение в виде треугольника с углом при вершине 30° и радиусом закругления 2,5 мм.

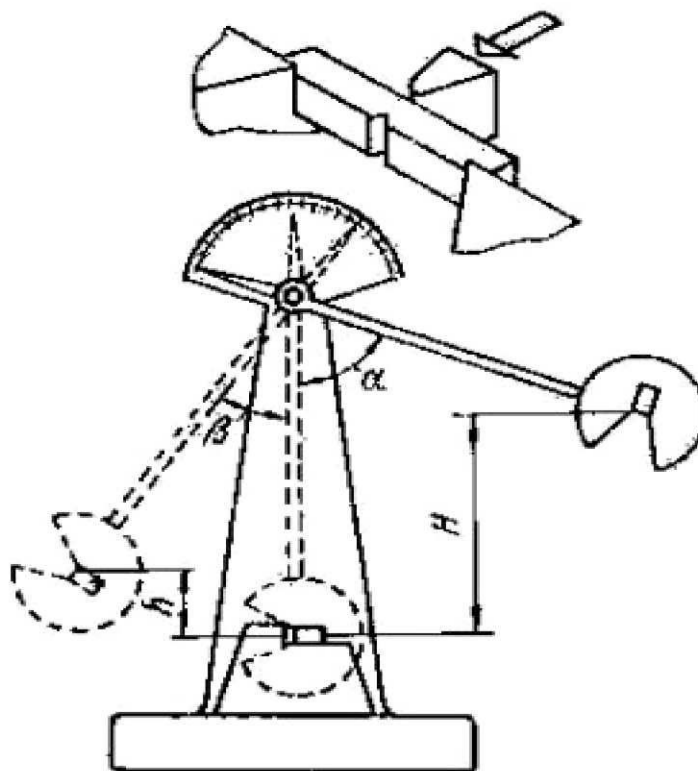


Рисунок 14 – Схема ударного изгиба на маятниковом копре

Испытания на изгиб проводятся на маятниковых копрах с предельной энергией, превышающей 900 Дж. При испытании образец кладут горизонтально в специальный шаблон, обеспечивающий установку надреза строго в середине пролета между опорами. Удар наносят со стороны, противоположной надрезу, в плоскости, перпендикулярной продольной оси образца. Маятник копра закрепляется в исходном верхнем положении на высоте от 0,8 до 2,5 м, что соответствует скорости ножа маятника в момент удара от 4 до 7 м/с. По шкале фиксируется угол подъема маятника α . Затем крепящую защелку вынимают, маятник свободно падает под собственной тяжестью, наносит удар по образцу, изгибает и разрушает его, поднимаясь относительно вертикальной оси копра на угол β . Этот угол тем меньше, чем большая работа A_n затрачена маятником на деформацию и разрушение образца.

Величина работы деформации и разрушения определяется разностью потенциальных энергий маятника в начальный (после подъема на угол α) и конечный момент испытания (после взлета на угол β):

$$A_n = P(H-h),$$

где P – вес маятника;

H и h – высоты подъема и взлета маятника.

Если длина маятника L , то

$$h=L(1-\cos\beta),$$

$$H=L(1-\cos\alpha),$$

и, следовательно,

$$A_n=PL(\cos\beta-\cos\alpha).$$

Последняя формула служит для расчета работы A_n по измеренным углам α и β (P и L постоянны для данного копра). Шкала копра может быть проградуирована в единицах работы, если угол подъема маятника α фиксирован.

Часть энергии удара затрачивается на сотрясение копра и фундамента, преодоление сопротивления воздуха, на трение в подшипниках, на упругую деформацию штанги маятника и др. В результате получаемые значения A_n оказываются завышенными на несколько процентов. Точность определения работы излома тем выше, чем меньше превышение запаса работы маятника над работой деформации и разрушения образца. Поэтому нужно стремиться, чтобы угол β после разрушения образца был небольшим.

Основная характеристика, получаемая в результате рассматриваемых испытаний – *ударная вязкость*:

$$a_n=A_n/F,$$

где F – площадь поперечного сечения образца в месте надреза до испытания.

Стандартная размерность ударной вязкости кгс \times м/см² (1 кгс \cdot м/см²~100 МДж/м²).

Ударные испытания можно проводить при отрицательных и повышенных температурах.

В массовых динамических испытаниях на изгиб образцов с надрезом ударная вязкость – единственная выходная характеристика испытания. Диаграмма деформации обычно не записывается, так как это сопряжено со значительными экспериментальными трудностями. Общее время испытания измеряется долями секунды, поэтому для фиксации зависимости нагрузки от деформации требуются малоинерционные чувствительные датчики быстродействующий прибор для записи диаграмм. Обычно используют пьезокварцевые динамометры и шлейфовые осциллографы.

При ударных испытаниях на изгиб образцов с надрезом напряжения и пластическая деформация концентрируются в ограниченной части объема образца вокруг надреза. Именно здесь поглощается практически вся работа удара. Повышение ударной вязкости материала часто сопровождается увеличением деформируемого объема в области надреза.

Возникновение схемы объемного растяжения, концентрация напряжений у надреза и рост предела текучести в результате ускорения деформации создают благоприятные условия для хрупкого разрушения.

При расчете ударной вязкости полную работу деформации разрушения относят к площади поперечного сечения F в надрезе. При испытании стандартных образцов величина l' постоянна и, следовательно, ударная вязкость прямо пропорциональна полной работе A_{II} . Поскольку в разных материалах или при различных температурах испытания пластически деформируются разные объемы, то при одинаковых значениях A_{II} получаются разные величины удельной работы (в расчете на единицу объема). Ударная вязкость же в этом случае оказывается одинаковой. Таким образом, характеристика ударной вязкости a_{II} является условной и это необходимо учитывать при сопоставлении разных материалов.

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 296 с.
4. Эпштейн Г.Н., Кайбышев О.А. Высокоскоростная деформация и структура металлов. М.: Металлургия, 1971. – 200 с.
5. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

Контрольные задания для СРС (тема 1) [1], [2], [12]

1. Особенности пластической деформации и разрушения при динамическом нагружении.
2. Структура металла при динамическом нагружении.
3. Динамические испытания на растяжение.
4. Динамические испытания на сжатие.
5. Динамические испытания на кручение.
6. Динамические испытания при сверхвысоких скоростях.
7. Динамическое кручение.

Раздел 8 Механические свойства, определяемые при циклических испытаниях

Тема 1 Циклические испытания (2 часа)

План лекции

1. Усталость и выносливость.
2. Усталостная трещина.
3. Задача усталостных испытаний.
4. Современные методы испытаний на усталость
5. Цикл напряжений.
6. Стандартные образцы.
7. Предел выносливости.

В условиях действия циклических напряжений в металлах и сплавах происходит зарождение и постепенное развитие трещин, вызывающее в конечном итоге полное разрушение детали образца. Это разрушение особенно опасно, так как может происходить под действием напряжений, намного меньших пределов прочности и текучести.

Процесс постепенного накопления повреждений в материале под действием циклических нагрузок, приводящий к уменьшению долговечности из-за образования трещин и разрушения, называют *усталостью*, а свойство противостоять усталости – *выносливостью*.

Усталостная трещина зарождается в поверхностных слоях и затем развивается вглубь образца или детали, образуя острый надрез. Процесс распространения усталостной трещины длителен. Он продолжается до тех пор, пока сечение не окажется столь малым, что действующие в нем напряжения превысят разрушающие. Тогда произойдет быстрое разрушение, как правило, хрупкое из-за наличия острого надреза.

Задача усталостных испытаний – дать количественную оценку способности материалам работать в условиях циклического нагружения без разрушения.

Современные методы испытаний на усталость (выносливость) разнообразны. Они отличаются характером изменения напряжений во времени, схемой нагружения (изгиб, растяжение – сжатие, кручение), наличием или отсутствием концентраторов напряжений. Усталостные испытания проводятся при различных температурах и в разных средах.

В процессе любого усталостного испытания на образец действуют циклические напряжения, непрерывно изменяющиеся по величине и часто по знаку. Пример показан на рисунке 15.

Цикл напряжений – это совокупность переменных значений напряжений за один период их изменения. Каждый цикл характеризуется несколькими параметрами. За максимальное напряжение цикла σ_{max} принимают наибольшее по алгебраической величине напряжение. Минимальное напряжение цикла σ_{min} – наименьшее по алгебраической величине напряжение.

Среднее напряжение цикла $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$.

Амплитуда напряжений цикла $\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$.

Сложение и вычитание максимальных и минимальных напряжений в этих формулах производят с учетом знака:

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a$$

Цикл характеризуется также коэффициентом асимметрии:

$$R_\sigma = \sigma_{max} / \sigma_{min}$$

Если $R_\sigma = -1$, то такой цикл называют симметричным (рисунок 15, кривая 1). Если же минимальное и максимальное напряжение цикла по величине не равны по величине, то он называется асимметричным. Когда напряжения меняются по величине и знаку, цикл считается знакопеременным (рисунок 15, кривые 1, 2), если только по величине – знакопостоянным (кривая 3). Для

испытаний чаще всего используют симметричные знакопеременные циклы с $R_\sigma = -1$.

Наиболее распространенная схема нагружения при усталостных испытаниях – изгиб. Особенно проста схема чистого изгиба образца при вращении. Нагрузка здесь прилагается в двух точках, что обеспечивает постоянство изгибающего момента на всей рабочей длине образца.

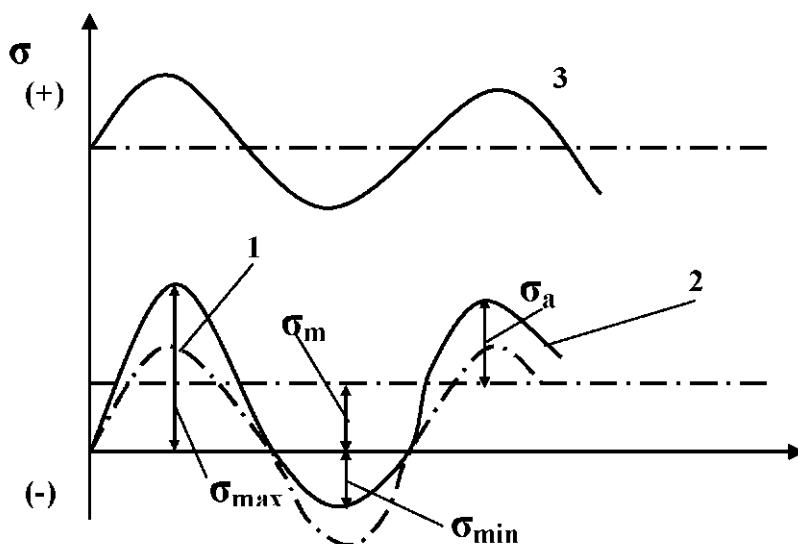


Рисунок 15 – Разновидности циклов напряжений

Помимо схемы чистого изгиба, часто применяют круговой изгиб консольно закрепленного образца. Его головка крепится в патроне, а к другому концу прилагается изгибающий момент. Максимальное значение изгибающий момент достигает только в одном сечении – вблизи основания консоли, что является недостатком данной схемы нагружения.

Для испытаний в условиях циклического растяжения – сжатия используют гидропульсационные и резонансные машины. Первые представляют собой универсальные машины с гидравлическим приводом для статических испытаний, снабженные гидропульсатором. Это однопоршневый маясляный насос, который присоединяется к рабочему цилиндру машины. Ход поршня насоса устанавливают в соответствии с заданной амплитудой напряжений цикла.

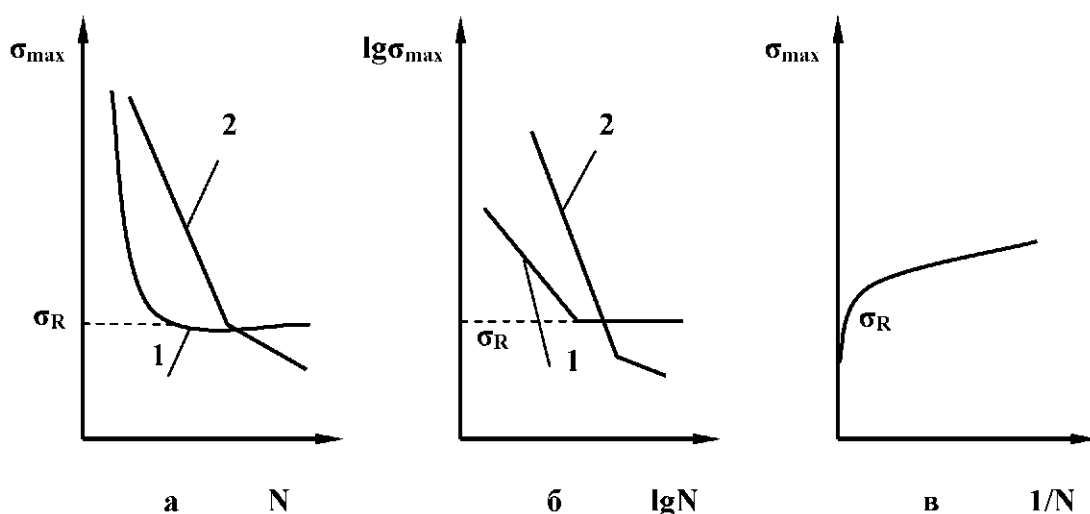
Резонансные машины для усталостных испытаний осуществляют циклическое растяжение – сжатие с помощью независимой от образца вибрирующей системы. Она состоит из плоской или цилиндрической рессоры и массы силового возбуждения.

Рабочая часть стандартных образцов имеет круглое или прямоугольное сечение. Диаметр цилиндрической части гладких образцов d обычно составляет 5...10 мм, а у образцов с надрезом $D=10...20$ мм при глубине надреза $t=0,25D$. Ширина рабочей части плоских образцов $b=10...20$ мм и толщина $a=5...10$ мм.

Усталостные свойства зависят от размеров образца – они значительно выше у образцов с меньшим сечением.

Первичным результатом усталостного испытания одного образца является число циклов до разрушения (долговечность) при заданных характеристиках цикла. Конечная цель испытания с постоянным коэффициентом – определения *предела выносливости* σ_R – наибольшего значения максимального предела цикла, при действии которого не происходит усталостного разрушения образца после произвольно большого или заданного числа циклов нагружения.

По результатам испытания отдельных образцов строят кривую усталости в координатах *максимальное напряжение цикла* σ_{max} (или σ_a) – *долговечность* N (рисунок 16, а). Из-за относительно большого разброса экспериментальных точек построение этих кривых рекомендуется проводить методом наименьших квадратов. Наиболее наглядны кривые усталости в логарифмических или полулогарифмических координатах (рисунок 16, б, в).



а – кривая в координатах σ_{max} - N ; б – кривая в логарифмических координатах;
в – кривая в полулогарифмических координатах

Рисунок 16– Кривые усталости в различных координатах

По мере уменьшения максимального напряжения цикла долговечность всех материалов возрастает. При этом у сталей кривая усталости асимптотически приближается к прямой, параллельной оси абсцисс (рисунок 16, кривая 1). Ордината, соответствующая постоянному значению σ_{max} , и есть предел выносливости таких материалов – наибольшее напряжение, которое не вызывает разрушения при любом числе циклов N . Многие цветные металлы и сплавы не имеют горизонтального участка на кривых усталости (рисунок 16, а, б, кривые 2). В этом случае выделяют ограниченный предел выносливости – наибольшее напряжение σ_{max} (σ_a), которое материал выдерживает, не разрушаясь в течение определенного числа циклов нагружения. Это число циклов называют *базой испытания*. Она обычно составляет 10^8 циклов (когда на кривой усталости имеется горизонтальный участок, испытания продолжают не более чем до 10^7 циклов).

Кривые усталости, построенные при использовании цикла $R_\sigma=-1$, для многих металлических материалов хорошо описываются уравнением Вейбулла:

$$\sigma_{max} = \sigma_{-1} + a(N+B)^{-\alpha},$$

где σ_{-1} – предел выносливости;

N – долговечность;

a, B, α – коэффициенты.

Величина B во многих случаях лежит в пределах от 0 до 10^4 циклов, и поэтому в стандартных испытаниях с большой базой ею можно пренебречь.

Статистическая обработка проводится для вероятностной оценки усталостной долговечности – числа циклов нагружения, которое выдерживает материал перед разрушением при определенном напряжении.

Для этого при четырех-пяти различных уровнях напряжений, превышающих σ_R материала, проводят испытание серии образцов. Их число на каждом уровне σ_{max} определяется свойствами и необходимой достоверностью результатов. Каждый образец испытывают до разрушения или до базового числа циклов. Затем результаты испытания образцов при каждом уровне напряжений подвергают статистической обработке, последовательно определяя i, P_i, N_i и $\lg N_i$. Здесь i – порядковый номер данного образца в возрастающем ряду долговечности образцов этой серии (от 1 до n – общего числа образцов в серии). P – накопленная частота, соответствующая вероятности разрушения: $P = (i - 0,5)/n$; N_i – долговечность i -го образца.

По полученным данным строят графики функций распределения вероятности разрушения образцов. По оси абсцисс откладывают десятичные логарифмы числа циклов, а по оси ординат – накопленные частоты в предположении, что ряд значений логарифмов долговечности подчиняется закону нормального распределения.

Величина предела выносливости снижается при наличии концентраторов напряжений. Для количественной оценки чувствительности σ_R к концентраторам определяют *эффективный коэффициент напряжений* K_σ . При симметричном знакопеременном цикле:

$$K_\sigma = \sigma_{-1} / \sigma_{-1H},$$

где $\sigma_{-1}, \sigma_{-1H}$ – пределы выносливости гладкого образца и образца с надрезом.

Усталостные свойства, как и всякие механические свойства, зависят от условий проведения испытаний, свойства и структуры металла.

Влияние характеристик цикла напряжения. Чем больше максимально напряжение цикла и его амплитуда, тем быстрее происходит усталостное разрушение.

Существенное влияние на характеристики выносливости 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.

Характер изменения напряжения между σ_{max} и σ_{min} мало сказывается на выносливости. 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.

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

Контрольные задания для СРС (тема 1) [1], [2], [9]

1. Методика проведения усталостных испытаний.
2. Схемы резонансных машин для проведения усталостных испытаний.
3. Пластическая деформация при циклическом нагружении.
4. Зарождение усталостных трещин.
5. Распространение усталостных трещин.
6. Влияние различных факторов на характеристики выносливости.

Раздел 9 Влияние температуры на прочность и пластичность материалов

Тема 1 Жаропрочность. Ползучесть (2 часа)

План лекции

1. Жаропрочность.
2. Предел кратковременной прочности.
3. Ползучесть.
4. Логарифмическая ползучесть.
5. Процесс возврата.
6. Скорость ползучести.
7. Повышение характеристик жаропрочности.

Длительные высокотемпературные испытания служат для оценки характеристик жаропрочности металлов и сплавов – их способности работать под напряжением в условиях повышенных температур без заметной остаточной деформации и разрушения.

Жаропрочность – это свойство металлов и сплавов длительно сопротивляться развитию пластической деформации и разрушению под действием постоянных нагрузок при высоких температурах. Численно жаропрочность может быть выражена пределом кратковременной прочности, пределом ползучести и пределом длительной прочности. Для определения предела кратковременной прочности используют обычные машины для

испытаний на растяжение, снабженные нагревательными устройствами. Для измерения температуры на образцах укрепляют термопары.

Предел кратковременной прочности (предел прочности при повышенной температуре) не характеризует в полной мере свойства материала при температуре испытаний. Эта характеристика дает представление о поведении материала при его горячей обработке давлением.

Длительная прочность является характеристикой сопротивления разрушению при длительном действии статической нагрузки и высокой температуры. Характеристикой длительной прочности является предел длительной прочности – величина напряжения, которое вызывает разрушение образца при данной температуре через определенный промежуток времени.

Ползучесть – явление непрерывной деформации под действием постоянного напряжения. В зависимости от температуры и уровня приложенного напряжения ползучесть протекает по разным законам. Наиболее известны 4 вида ползучести: высокотемпературная ползучесть (ползучесть Андраде), диффузионная ползучесть, низкотемпературная ползучесть (логарифмическая ползучесть), неупругая ползучесть (обратимая ползучесть). Изменение характера кривых ползучести с повышением температуры испытания при постоянном напряжении показано на рисунке 25.

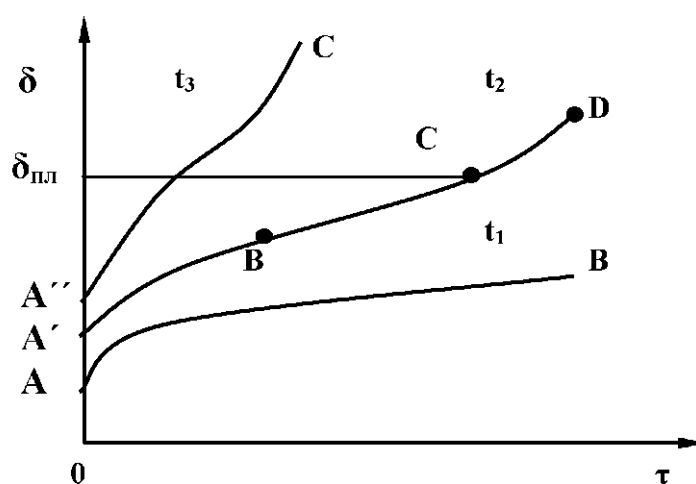


Рисунок 25 – Кривые ползучести при разных температурах ($t_1 < t_2 < t_3$)

Логарифмическая ползучесть. Представим себе, что в образце имеется какое-то количество дислокационных отрезков и каждый из них может переместиться один раз. После приложения нагрузки и неупругого удлинения образца (OA , рисунок 25) наиболее благоприятно ориентированные переместятся и произойдет пластическая деформация. В условиях постоянства приложенного напряжения оставшиеся дислокации будут удерживаться препятствиями, но с течением времени флуктуации тепловой энергии вызовут движение большинства этих дислокационных отрезков (в основном за счет поперечного скольжения) и соответствующий прирост удлинения. Однако постепенно процесс термически активируемого скольжения будет затухать (истощаться) из-за уменьшения числа дислокационных отрезков, способных перемещаться и

вызывать деформацию. В результате затухает скорость прироста относительного удлинения.

Логарифмическая ползучесть является неустановившейся: скорость ползучести непрерывно уменьшается со временем. С неустановившейся стадии начинается и высокотемпературная ползучесть (отрезок $A'B$ на кривой $OA'BCD$, рисунок 25). Затем начинается стадия установившейся ползучести (BC), при которой $v_n = \text{const}$. Заканчивается кривая высокотемпературной ползучести участком разрушения (CD), до которого при испытаниях на ползучесть никогда не доходят.

Основное отличие высокотемпературной ползучести от низкотемпературной заключается в более полном протекании возврата, который обеспечивается здесь переползанием дислокаций.

Принципиально ползучесть на установившейся стадии не отличается от неустановившейся. В металлах скорость установившейся ползучести контролируется обычно наиболее медленным процессом переползания дислокаций.

Пластическая деформация при ползучести вызывает увеличение плотности дислокаций и деформационное упрочнение. В то же время возврат приводит к уменьшению плотности дислокаций и разупрочнению металла. В результате возврата при высокотемпературной ползучести в металле формируется полигональная структура.

Основные процессы, определяющие возврат, - поперечное скольжение и переползание дислокаций.

Скорость ползучести v_n :

$$v_n = v/L^3 = (2 \cdot \sigma \cdot b^3 \cdot D) / L^2 \cdot kT,$$

где v – скорость миграции вакансий;

σ – приложенное напряжение;

T – абсолютная температура;

b^3 – объем, приходящийся на одну вакансию;

L – длина стороны зерна;

D – коэффициент диффузии.

Повышение характеристик жаропрочности (пределов ползучести и длительной прочности, релаксационной стойкости при высоких температурах) осуществляется теми же способами, что и применительно к прочностным свойствам при статических испытаниях.

Повышение жаропрочности при переходе от чистых металлов к сплавам достигается за счет образования твердых растворов на базе основного металла и частиц избыточных фаз. При выборе основы следует учитывать, что уровень жаропрочности чистого металла связан с температурой его плавления. Чем она выше, тем больше прочность межатомных связей, меньше скорость самодиффузии и, следовательно, меньше при той же температуре скорость ползучести, контролируемая скоростью переползания дислокаций. Исходя из этих же соображений, температура солидуса сплавов также должна быть по возможности выше. Если температура плавления сплава значительно ниже, чем

металла-основы, то при высоких температурах чистый металл может оказаться прочнее сплава.

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 296 с.
4. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

Контрольные задания для СРС (тема 1) [1], [2], [4], [12]

1. Высокотемпературная ползучесть.
2. Неупругая ползучесть.
3. Диффузионная ползучесть.
4. Низкотемпературная ползучесть.
5. Дислокационная модель ползучести.
6. Схема машины ИП-2 для испытаний на ползучесть.
7. Особенности пластической деформации при высокотемпературной ползучести.
8. Испытания на релаксацию напряжений.
9. Влияние различных факторов на жаропрочность.

Раздел 10 Разрушение материалов

Тема 1 Разрушение материалов (2 часа)

План лекции

1. Виды разрушения.
2. Схемы разрушения.
3. Отрыв.
4. Срез.
5. Стадии хрупкого и вязкого разрушения.
6. Механика разрушения.
7. Теория Гриффитса.

Классификация видов разрушения

Всякий процесс деформации по достижении достаточно высоких напряжений заканчивается разрушением. Процесс разрушения начинается с образования трещин субмикроскопических размеров и заканчивается макроскопическим разделением образца на отдельные части. Ряд важнейших механических свойств металлов и сплавов характеризует их сопротивление разрушению, величину или работу деформации до разрушения.

Мы уже отмечали три вида напряжений: сжимающие (отрицательные нормальные), растягивающие (положительные нормальные) и касательные.

Сжимающие напряжения сами по себе не могут вызвать разрушения. Оно происходит под действием растягивающих или касательных напряжений. В макроспических теориях прочности различают два вида разрушения: 1) отрыв в результате действия растягивающих напряжений и 2) срез под действием касательных напряжений.

В таблице 4 представлены соответствующие схемы для ряда испытаний. Пользуясь этой таблицей, можно по внешнему виду разрушенных образцов определять вид разрушения. Однако эти схемы могут быть точно реализованы в том случае, когда заданная при нагружении схема напряженного состояния остается неизменной от начала испытания и до окончательного разрушения образца. На самом деле эта схема может меняться как в процессе пластической деформации (например, при образовании шейки), так и в процессе разрушения – в результате развития трещин. Поэтому вид разрушенных образцов часто отличается от приведенных в таблице 4. В таких случаях необходимо изучать направление развития трещин на начальных стадиях разрушения. Если схема напряженного состояния при деформации не меняется до разрушения, то по этим направлениям можно оценить, начинается ли разрушение под действием нормальных или касательных напряжений.

Таблица 4 – Схемы разрушения путем отрыва и среза при различных механических испытаниях (по Я. Б. Фридману)

Вид испытания	Схема нагружения	Направление действия напряжения		Вид разрушения	
		нормальное	касательное	отрыв	срез
Растяжение					
Сжатие					
Кручение					
Изгиб					

Считается, что отрыв может произойти без предварительной макропластической деформации, в то время как разрушению путем среза такая

деформация всегда предшествует. Поэтому отрыв часто соответствует хрупкому, а срез – вязкому (пластичному) разрушению.

Внешне хрупкое и вязкое разрушение отличается в первую очередь величиной пластической деформации. Точно установлено, что любому, в том числе и хрупкому разрушению металлов и сплавов, предшествует какая-то пластическая деформация. Перед хрупким разрушением она обычно намного меньше, чем перед вязким, но четкой количественной границы здесь провести нельзя.

Оба типа разрушения – вязкое и хрупкое – включают в себя две стадии: 1) зарождение зародышевой трещины и 2) 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.

В поликристаллах трещина при разрушении может распространяться по телу зерна или вдоль границ. Соответственно различают внутризеренное (транскристаллитное) и межзеренное (интеркристаллитное) разрушение. При низких температурах межзеренное разрушение обычно наблюдается в хрупких материалах и обусловлено наличием на поверхности границ зерен частиц хрупких избыточных фаз или сегрегации примесей. Такое разрушение может происходить также при повышенных температурах, в условиях интенсивного развития межзеренной деформации.

Механика разрушения

Разрушение является процессом, развивающимся во времени в локальных объемах металла, приводящим к глобальному нестабильному разрушению при достижении предельного состояния. Основной задачей механики разрушения является разработка метода расчета деталей на прочность при наличии развивающейся трещины. Кроме того, необходимо уметь определять:

1) какой материал и в каком структурном состоянии является оптимальным для заданных условий нагружения;

2) какие наиболее информативные методы и критерии следует выбрать для выявления сопротивления материала зарождению и распространению трещины;

3) требования к технологии изготовления изделия, при которой повреждаемость материала минимальна;

4) как проектировать изделие с точки зрения наиболее благоприятного распределения напряжений у предполагаемых дефектов и концентраторов напряжений;

5) историю разрушения по фрактографическим параметрам.

Таким образом, механика разрушения занимает основные позиции не только в материаловедении, технологии и конструировании деталей машин и агрегатов, но и в диагностике и инспекции разрушения. Знание основных

закономерностей разрушения материала необходимо и достаточно для решения перечисленных выше задач механики трещин.

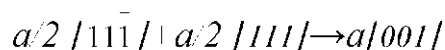
В динамике трещин важным параметром является текущая скорость движения трещины, по которой контролируют распределение напряжений и перемещений у края трещины, а следовательно, и поток энергии к краю трещины. Из теории Гриффитса следует, что при росте трещины в упругом теле высвобождающаяся упругая энергия полностью поглощается у края трещины, то есть расходуется на образование свежих поверхностей раздела. Однако при движении трещины в упругопластическом теле высвобождающаяся энергия не может полностью поглощаться в результате необратимых пластических деформаций у края трещины. Переход от условий притока энергии к краю трещины к условиям оттока ее от края трещины при субкритическом росте трещины носит скачкообразный характер и сопровождается изменением микромеханизма разрушения, определяющим скорость процесса, что влечет за собой и изменение морфологии поверхности трещины.

Атомный механизм зарождения качественно одинаков при хрупком и вязком разрушении. Зарождению трещины всегда предшествует какая-то пластическая деформация, то есть движение дислокаций.

Наиболее часто трещины возникают у вершин скоплений дислокаций вблизи каких либо барьеров: включений избыточных фаз, границ зерен, двойников, сидячих дислокаций и другие. Из схемы на рисунке 31 видно, что в непосредственной близости от барьера краевые дислокации в плоском скоплении могут под действием напряжений оказаться настолько тесно прижатыми друг к другу, что их экстраплоскости сливаются, а под ними образуется зародышевая микротрещина.

Эта схема прямо предполагает необходимость некоторой пластической деформации, достаточной для образования дислокационных скоплений. Трещина образуется в плоскости, перпендикулярной плоскости скольжения дислокаций, под действием растягивающих напряжений, в результате концентрации касательных напряжений в головной части скопления. Расчеты показывают, что при действии такой модели трещина возникает, когда величина локальных касательных напряжений у вершины скопления достигает значения $\sim 0,7$ модуля сдвига.

Для металлов с о.ц.к.-решеткой одной из модификаций этой схемы является модель, предложенная Коттрелом (рисунок 26). Допустим, что в растягивающем образце дислокации с векторами Бюргерса $a/2 [111]$ и $a/2 [\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ скользят в пересекающихся плоскостях (101) и $(\bar{1}0\bar{1})$. При встрече этих дислокаций возникает новая, расположенная в плоскости (100) :



Многократное повторение этого взаимодействия приводит к слиянию новых дислокаций $a[001]$, что в конце-концов вызывает образование зародышевой трещины. Схема Коттрелла не требует наличия барьеров для дислокаций в исходном состоянии. Барьеры, а затем дислокационные скопления и трещины образуются в результате пластической деформации.

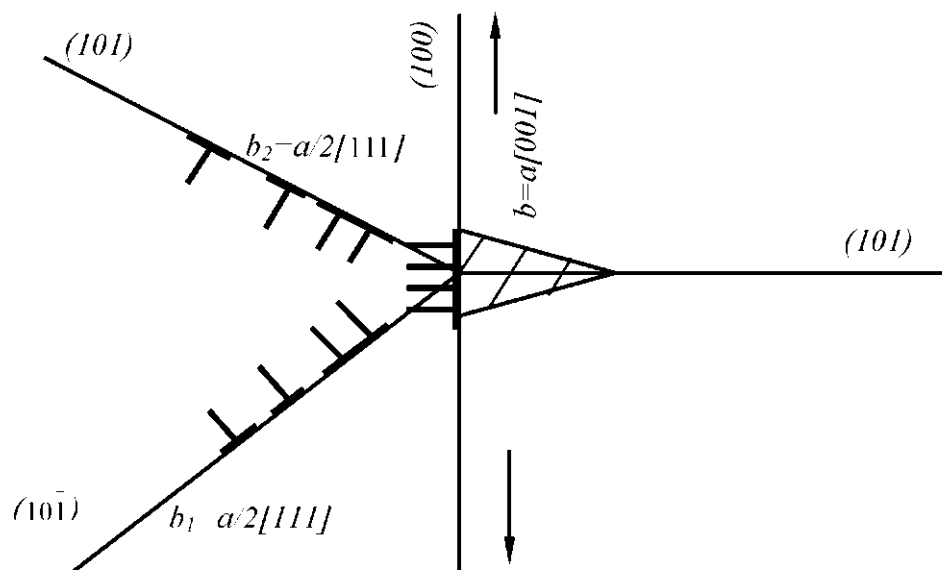


Рисунок 26 – Схема зарождения трещин в о.ц.к. – металлах (по Коттреллу)

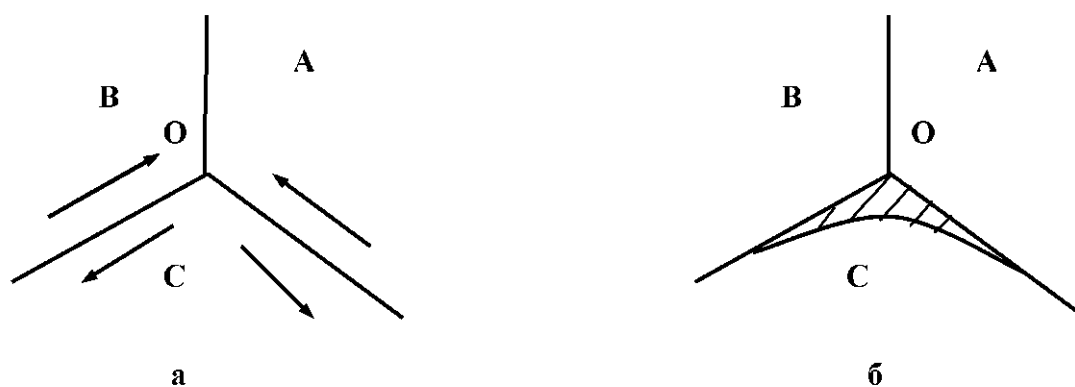
Иногда трещина образуется не у вершины скопления, а внутри него. Отрыв по плоскости скольжения происходит под действием нормальных напряжений. Они возникают в результате искривления плоскостей скольжения дислокациями, располагающимися в других плоскостях. Искривление поверхности скольжения при сдвиге вдоль нее вызывает появление нормальных напряжений.

Зарождение трещин может происходить и без дислокационных скоплений. Так, в металлах с г.п.у.-решеткой наблюдается возникновение трещин в результате перерезания малоугловой границы при пластической деформации.

Часто зарождение трещин наблюдается в месте встречи двойника деформации с каким-либо прочным барьером, например, границей зерна или другим двойником. Как известно, двойники распространяются с высокой скоростью и возникающие при столкновении с препятствием напряжения не успевают релаксировать. Особенно благоприятные условия для зарождения трещин создаются при встрече растущего двойника деформации с ранее образовавшимся, для которого было характерно другое направление двойникования. В этом случае концентрация напряжений в месте встречи особенно велика.

В условиях сильно развитой межзеренной деформации увеличивается вероятность зарождения трещин на границе перемещающихся друг относительно друга кристаллитов.

Рассмотрим стык трех зерен (рисунок 27) в растягиваемом образце. Межзеренные смещения будут происходить в основном вдоль границ между зернами $A-C$ и $B-C$, где действуют большие касательные напряжения (рисунок 27, а).



а – действие касательных напряжений; б – зарождение трещины

Рисунок 27 – Схема зарождения трещины в стыке трех зерен за счет межзеренной деформации

В результате трещина зарождается вблизи места стыка O и распространяется вдоль границ $A-C$ и $B-C$ (рисунок 27, б). На практике с такой схемой зарождения трещин в результате межзеренных смещений встречаются обычно при высокотемпературных длительных испытаниях. В этих условиях возможно зарождение пор (трещин) путем слияния вакансий.

Рассмотренные основные схемы зарождения трещин показывают, что разрушение металлов с разной решеткой и микроструктурой может начинаться по-разному.

В конечном итоге сопротивляемость металла или сплава разрушению и характер разрушения определяются условиями, в которых оказывается возникшая по тому или иному механизму микротрещина. Вторая стадия разрушения – распространение трещины – является решающей.

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография. – Челябинск: Металлургия, 1988. – 400 с.
4. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 296 с.
5. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

Тема 2 Хрупкое и вязкое разрушение (2 часа)

План лекции

1. Вязкое разрушение.
2. Условия зарождения и развития вязких трещин.
3. Образование центральной трещины.

4. Формы изломов при вязком разрушении.
5. Хрупкая трещина.
6. Формы изломов при хрупком разрушении.
7. Критерий Гриффитса.

Вязкое и хрупкое разрушение

Вязкое разрушение происходит после значительной пластической деформации (десятки процентов). Это наименее опасный вид разрушения, и ему уделяют не так много внимания, как хрупкому. Тем не менее анализ вязкого разрушения очень важен. Он позволяет, в частности, лучше понять механизм хрупкого разрушения и наметить меры его предотвращения. Вязкое разрушение важно при анализе поведения металлов в условиях обработки давлением, где создаются значительные пластические деформации, и разрушение, в том числе вязкое, недопустимо.

Наиболее характерным примером вязкого разрушения является образование “чашечного” излома в шейке растягиваемого образца. Шейка образуется после некоторого равномерного удлинения образца и является результатом локализации деформации в ограниченном объеме. Внутри шейки схема напряженного состояния усложняется по сравнению с исходным одноосным растяжением. В этих условиях и происходит зарождение и развитие вязких трещин.

Чаще всего в технических металлах и сплавах реализуется первая схема зарождения трещин – у скоплений дислокаций вблизи барьеров: различного рода включений, которые всегда содержатся в технических металлах. Возможно также появление первых трещин внутри хрупких включений, которые разрушаются раньше, чем образуются достаточно мощные дислокационные скопления в матрице. Возникшие зародышевые трещины под действием напряжений начинают постепенно расти и по достижении микронных размеров уже легко выявляются при металлографическом анализе. На начальной стадии вязкого разрушения типичным является наличие множества мелких трещин (пор), концентрирующихся в основном в центральной части сечения шейки. По мере дальнейшего растяжения эти мелкие поры сливаются с образованием более крупных и в конце концов в центре шейки образуется сплошная трещина, плоскость которой в макромасштабе располагается нормально внешнему растягивающему усилию. Следовательно, образование этой центральной трещины – результат разрушения путем отрыва. Дальнейший ее рост происходит за счет присоединения новых пор путем разрыва перемычек между ними и основной трещиной.

Для того чтобы понять, почему разрушение на начальных стадиях локализуется в центральной части шейки, необходимо проанализировать распределение напряжений по сечению шейки. Вблизи центра образца все напряжения максимальны. Особенно велико здесь продольное растягивающее напряжение σ_l , в то время как касательные напряжения распределены гораздо более равномерно. В результате трещины возникают и развиваются в средней части сечения шейки, и здесь же происходит разрушение путем отрыва с

образованием центральной трещины.

По достижении центральной трещиной периферийных слоев шейки все напряжения локализуются в этих неразрушенных периферийных участках. Скорость распространения трещины резко возрастает, меняется и направление ее развития. В стенках шейки действуют в основном продольные напряжения и соответственно касательные в плоскостях, наклоненных под углом $\approx 45^{\circ}$ к оси образца. Из-за локализации пластической деформации в плоскостях действия максимальных касательных напряжений дальнейшее разрушение идет путем среза. В результате центральная часть трещины образует “дно”, а периферийные – конусные “стенки” чашки излома. Как видно, незначительная пластическая деформация не только предшествует вязкому разрушению, но и продолжается в процессе его развития.

Кроме рассмотренного случая вязкого разрушения, возможно образование изломов другой формы. Последняя определяется геометрией образца, характером его деформации и степенью пластичности. Например, монокристаллы, а также поликристаллы высокоуглеродистой стали и некоторых металлов с низкой пластичностью могут при низких температурах вязко разрушаться без образования шейки, давая “плоскую” поверхность разрушения после сдвиговой деформации вдоль сечения образца под углом $\approx 45^{\circ}$ к оси растяжения. Наоборот, при растяжении цилиндрических образцов с высокой пластичностью, в частности сверхпластичных, относительное сужение близко к 100 % и шейка превращается в точку. У аналогичных плоских образцов шейка вырождается в линию, располагающуюся под углом $\approx 45^{\circ}$ к оси растяжения. Вообще при вязком разрушении растягиваемых плоских образцов из-за локализации пластической деформации в плоскостях действия максимальных касательных напряжений часто получается излом, характерный для разрушения путем среза. Естественно, что при изменении схемы нагружения образца геометрия излома меняется.

Вне зависимости от макрогеометрии вязкий излом в шейке характеризуется рядом общих особенностей своей структуры. При визуальном осмотре невооруженным глазом он обычно матовый, неровный, часто со следами пластической деформации в виде грубых полос скольжения. Вязкое разрушение, как правило, бывает внутризерненным. Тонкую структуру излома выявляют с помощью фрактографического анализа – исследования структуры поверхности разрушения в световом и электронном (с помощью реплик) микроскопах. Фрактографический анализ, получивший широкое развитие в последние годы, дает важную информацию о механизме разрушения. Показан типичный пример микроструктуры вязкого излома. У него характерный рельеф, образуемый совокупностью отдельных фасеток, каждая из которых соответствует либо бывшей микропоре (трещине), либо перемычке между порами, которая разрушилась при их слиянии. На поверхности этих перемычек, а также на дне некоторых ямок (следов пор) часто видны линии скольжения, образовавшиеся при пластической деформации перед разрушением. На дне многих ямок выявляются частицы избыточных фаз (включений сульфидов), что как раз и служит доказательством возникновения большинства зародышевых

трещин у этих включений.

На “стенках” чашечного излома наблюдаются сильновытянутые лунки, а также области, не имеющие характерных особенностей структуры. Эти области имеются также на поверхности “плоского” излома. Они являются результатом разрушения металла вдоль поверхности локализованного интенсивного сдвига.

Общего количественного критерия вязкого разрушения не существует. Для ограниченного интервала условий таким критерием может служить величина либо деформации, либо минимального нормального или касательного напряжения, достаточного для развития вязкого разрушения. С практической точки зрения хрупкое разрушение гораздо важнее вязкого. Это наиболее опасный вид разрушения, идущий быстро и под действием сравнительно низких напряжений. Металлы и сплавы идеально хрупко, то есть без предварительной пластической деформации не разрушаются.

Хрупкая трещина при внутризеренном разрушении обычно распространяется вдоль кристаллографической плоскости с малыми индексами. При межзеренном разрушении хрупкая трещина в однофазных материалах распространяется по поверхности границ зерен, а при наличии границ второй фазы – вдоль межфазной поверхности или вдоль поверхности скола внутри включений. В зависимости от характера распространения трещины структура поверхности разрушения получается различной. В целом структура поверхности скола резко отличается от вязкого излома. При простом осмотре хрупкий излом обычно блестящий или имеет цвет фаз, расположенных по границам зерен. Под микроскопом видно, что внутрикриталлитный хрупкий излом не идеально гладок. На поверхности скола обычно имеются ступеньки, придающие структуре волнистый вид, так называемых “речных узоров”. В поликристаллических образцах вид этих узоров при переходе от зерна к зерну меняется. Каждая линия “речного узора” соответствует разнице в уровнях, то есть ступеньке на поверхности излома. В большинстве случаев хрупкое разрушение происходит путем распространения одной трещины. В этом случае причиной образования уступов может быть, например, пересечение трещиной винтовых дислокаций, которые располагаются на пути распространения фронта трещины. Если она развивается вдоль кристалла и встречает на своем пути, например, две винтовые дислокации, то после разделения кристалла на две половины поверхность каждой из них будет содержать две ступеньки переменной высоты.

В процессе развития трещины такие ступеньки могут укрупняться. В результате пересечения множества дислокаций возникают ступеньки, высота которых достаточна для их выявления при микроскопическом анализе. Краевые дислокации не могут быть причиной образования ступенек; на малоугловых наклонных границах хрупкая трещина только меняет свое направление.

Хрупкое разрушение легче поддается количественному анализу. Для идеально хрупкого разрушения упругого тела, когда пластическая деформация совсем не идет, используется критерий Гриффитса;

$$\sigma = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot \gamma}{\pi \cdot c}},$$

где σ – наименьшее растягивающее напряжение, необходимое для распространения трещины как хрупкой;

E – модуль Юнга;

γ – поверхностная энергия стенок трещины, отнесенная к единице ее площади;

c – половина длины трещины.

Критерий Гриффитса исходит из положения о том, что трещина распространяется, если увеличение γ меньше энергии деформации, высвобождающейся в результате роста трещины.

При хрупком разрушении металлов и сплавов до начала образования трещины и в процессе ее распространения идет пластическая деформация. В этих условиях γ в уравнении Гриффитса характеризует общую энергию, необходимую для увеличения единичной площади трещины. Сюда входит истинная поверхностная энергия и работа пластической деформации, которую необходимо затратить для развития трещины.

Основным условием для превращения трещины в “гриффитовскую” (которая распространяется как трещина скола) является ее достаточная длина и малая величина работы пластической деформации.

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография. – Челябинск: Металлургия, 1988. – 400 с.
4. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 296 с.
5. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

Контрольные задания для СРС (темы 1, 2) [1], [2], [7], [10], [12]

1. Типы разрушения металлов.
2. Вязкое разрушение.
3. Хрупкое разрушение.
4. Критерий Гриффитса для хрупкого разрушения.
5. Переход из хрупкого состояния в пластическое.
6. Способы борьбы с хладноломкостью.

Раздел 11 Новый подход к оценке механических свойств

Тема 1 Синергетика (2 часа)

План лекции

1. Синергетика.
2. Точка бифуркации.
3. Диссипативные структуры.
4. Самоорганизующиеся процессы.
5. Автоволны.
6. Универсальное свойство нелинейных систем.
7. Теория фракталов.

Синергетика – научное направление, изучающее связи между элементами структуры (подсистемами), которые образуются в открытых системах благодаря интенсивному (потокосому) обмену веществом и энергией с окружающей средой в неравновесных условиях. В таких системах наблюдается согласованное поведение подсистем, в результате чего возрастает степень ее упорядоченности, то есть уменьшается энтропия (так называемая самоорганизация). Основа синергетики – термодинамика неравновесных процессов, теория случайных процессов, теория нелинейных колебаний и волн.

Это направление базируется на междисциплинарном подходе к изучению появления и развития упорядоченных во времени и пространстве процессов или структур.

Термин “синергетика” произошел от греческого слова “синергия”, означающий содействие или сотрудничество. Синергетика изучает процессы самоорганизации, развития, устойчивости и распада различных структур, которые являются общими для живой и неживой природы. Общность заключается в том, что биологическим, химическим, физическим и другим процессам свойственны неравновесные фазовые переходы, отвечающие особой точке (*точке бифуркации*), при достижении которой скачкообразно изменяются свойства среды. Неравновесные фазовые переходы обладают рядом особенностей по сравнению с обычными фазовыми переходами. Например, они чувствительны к конечным размерам образцов, в форме границ и т. п. В открытых системах, обменивающихся энергией и веществом с окружающей средой, однородное состояние равновесия может терять устойчивость и необратимо переходить в неоднородное стационарное состояние, устойчивое относительно малых возмущений. Такие стационарные неоднородные состояния получили общее название *диссипативных структур*. Движущей силой процесса их формирования является стремление открытых систем при нестационарных процессах, вдали от равновесия, к минимуму производства энтропии. Традиционно под структурой объекта понимают обычно наличие в нем тождественных упорядоченных построений, сохраняющихся при внешнем воздействии; структура противопоставляется хаосу. Синергетика же оперирует со структурой, которая формируется в открытой системе и в обычном понимании может быть отнесена к беспорядку, и суть вопроса заключается в отыскании порядка в этом кажущемся беспорядке, то есть в установлении “упорядоченного хаоса”. Синергетика оперирует как с самоорганизующимися структурами, так и с процессами. К самоорганизующимся процессам относят автоколебательные процессы или устойчивые незатухающие колебания,

которые независимо от начальных возмущений сохраняются в определенном режиме. Таким образом, развитие синергетики стимулировало и анализ автоволновых процессов, вызываемых потерей устойчивости однородного равновесного состояния.

Автоволны представляют собой самоподдерживающиеся сигналы, которые индуцируют процессы локального высвобождения запасенной в среде энергии, затрачивающейся на инициирование аналогичных процессов в соседних областях. Автоволны такого типа выделены в особый класс по той причине, что они резко отличаются от волн других типов (электромагнитных, механических и др.), которые сходны только по одному лишь свойству – свойству огибать препятствия (дифрагировать). Синергетика дает ключ к обобщению полученных к настоящему времени экспериментальных данных о поведении металлов и сплавов под нагрузкой с целью установления общих закономерностей разрушения. Изучение связи между структурой и свойствами деформируемого твердого тела необходимо для выяснения физики процесса разрушения и разработки новых материалов.

С позиции нелинейной динамики структура материала рассматривается как динамическая система. В процессе нагружения структура в динамической неравновесной системе может находиться в различных состояниях: от вихревого движения элементов на разных уровнях до самоорганизации – ламинарного течения структурных элементов. Исследования механизмов структурных изменений выполняли на полированных образцах из сплава Д16, которые подвергались одноосному растяжению вплоть до разрушения на установке ИМАШ. В процессе деформации с помощью цифровой видеокамеры регистрировали увеличенное под оптическим микроскопом изображение участка поверхности образца. Одновременно регистрировали параметры акустической эмиссии (АЭ). Для количественной оценки эволюции структуры поверхности деформируемых образцов использовали методику мультифрактальной параметризации.

На рисунке 28 представлены изменения параметров энергии АЭ ΣE и фрактальных характеристик (фрактальная размерность D_0 и однородность F_{40}), полученные в процессе деформации.

Как видно, D_0 растет по мере роста деформации образца, на всем диапазоне наблюдается дискретный характер изменения D_0 . Есть основания предполагать, что структурные изменения в процессе деформации сопровождаются выделением ΣE энергии, причем начальная стадия этих изменений сопровождается ярко выраженным скачком, а последующие стадии – небольшими скачками одинаковой величины. Анализируя зависимость $D_0-f(\varepsilon)$ и $F_{40}-f(\varepsilon)$, можно отметить, что наибольший рост параметров D_0 и F_{40} наблюдается в области первого максимального скачка энергии. Последующие изменения параметра D_0 значительно меньше первоначального скачка. На зависимости $F_{40}-f(\varepsilon)$ наблюдается особенность в области $\varepsilon=17,5\%$, которая соответствует области наибольшего скачка на кривой накопления числа импульсов. Кроме этого, на зависимости $\Sigma N-f(\varepsilon)$ имеется скачок в области наибольших изменений ΣE , D_0 и F_{40} .

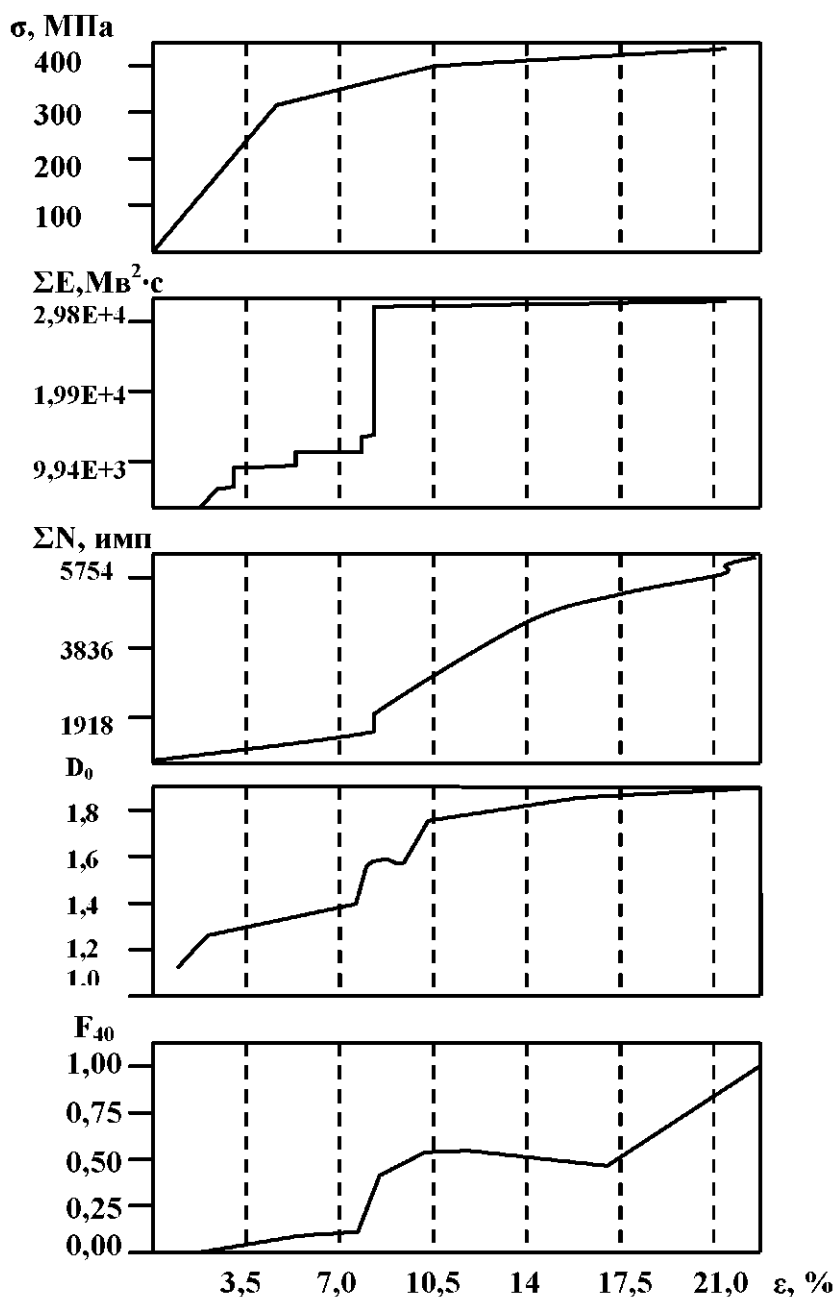


Рисунок 28 – Временные зависимости фрактальных и акустических параметров при деформации Д16

Универсальное свойство нелинейных систем – рост энтропии и образование диссипативных структур в точках бифуркации. В этой связи накопленная энтропия может рассматриваться как критерий предельного состояния твердого тела и его устойчивости. Одна из разновидностей энтропии – информационная энтропия $S_u = -\sum p_i \lg p_i$, где p_i – вероятность. В процессе испытаний углеродистых сталей фиксировали S_u по сигналам АЭ, а также определяли D_0 , при этом сигналы АЭ были представлены как временные ряды. В результате испытаний определено, что растяжение образца сопровождается периодическим изменением (колебанием) S_u сигнала АЭ. Разрушение образца происходит при росте энтропии.

Теория фракталов широко используется для оценки характера движения системы: периодического или хаотического. В этой связи, информационные критерии оценки устойчивости сложных систем S_n , D_0 следует использовать для оценки механизма потери структурной устойчивости твердых тел при деформировании. Существует ряд механизмов (сценариев) развития динамического хаоса в системах. Универсальным сценарием развития хаоса является удвоение периода. Экспериментально показано, что при растяжении образца на стадии предразрушения изменение сигнала АЭ происходит по удвоенному периоду. В результате движение структурных элементов (блоков, зерен) будет хаотическим (вихревым). Более корректно определять степень хаотичности структурных изменений непосредственно в процессе деформации (растяжения) образца на основе реконструкции по временному ряду (сигналам АЭ), то есть по предельному циклу, соответствующему ламинарному (устойчивому) движению структурных элементов, либо по фрактальному (хаотичному) аттрактору.

Известно, что причиной пространственного временного хаоса является чувствительность параметров системы к начальным данным. По-видимому, фрактальный характер диссипативных структур деформированного твердого тела обусловлен теми свойствами траектории, которые превращают их из регулярных и периодических в хаотические. Локальная сдвиговая неустойчивость зерен усложняет их траекторию движения, делая ее непредсказуемой. В результате реализуются поворотные (вихревые) моды деформации на различных структурных уровнях. При растяжении образца фрактальная размерность растет, при усталостном нагружении она также растет, но в три этапа. Совместный анализ зависимостей фрактальной размерности, истинной деформации, истинного напряжения показал, что началу каждого этапа роста фрактальной размерности соответствует удвоение удельной энергии, подведенной к образцу в процессе деформации.

Таким образом, экспериментальные данные свидетельствуют об универсальном характере потери структурной устойчивости состояния деформированного тела. Переход от упругой деформации к пластической можно назвать мягким сценарием потери устойчивости деформированной системы. Дальнейшая хаотизация и потеря структурной устойчивости деформируемой системы может развиваться через цикл удвоенного периода из-за потери устойчивости первого цикла. Затем может происходить потеря устойчивости второго цикла, что сопровождается ростом энтропии, и разрушением образца. Это соответствует катастрофе. Анализ изменения (колебаний) информационной S_n энтропии указывает на то, что процесс разрушения образца есть последовательные акты самоорганизации при $dS \rightarrow \text{тах}$, которые в зависимости от σ - τ (рисунок 28) проявляются как плато с последующим саморазрушением дефектных структур.

Мягкая потеря устойчивости структурного состояния (рисунок 28) – площадка текучести – есть результата снижения локальной сдвиговой неустойчивости в кристалле, а образование шейки перед разрушением – это потеря глобальной сдвиговой устойчивости, когда формирование хаотической

(вихревой) структуры происходит по всей площади образца на высоком структурном уровне. Последнее согласуется с результатами исследований регистрации энтропии S_n , которое достигает максимума при разрушении образца. Поэтому последний этап разрушения классифицируется как катастрофа.

Как известно, для предотвращения усталостного разрушения нужно максимально уменьшить локализацию деформации, исключить формирование полосовой структуры, не допускать зернограничного проскальзывания, усиливать локальную сдвиговую устойчивость решетки. При разработке интеллектуальных технологий синтеза материалов ключевым моментом является информационный (интеллектуальный) блок, органически входящий в технологическую цепочку синтеза материалов. В этой связи, концепция синтеза новых материалов должна основываться на использовании алгоритмов подходов искусственного интеллекта, в частности, нейронных сетей.

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография. – Челябинск: Металлургия, 1988. – 400 с.
4. Иванова В.С., Оксогоев А.А., Закиричная М.М., Пруцков М.Е. Оптимизация структуры машиностроительных материалов // Металлургия машиностроения, № 6, 2002. – С. 18-29.
5. Кабалдин Ю.Г., Семашко Н.А., Евстигнеев А.И. Интеллектуальный подход к процессам разрушения и синтеза материалов // Металлургия машиностроения. – 2002. - № 5. С. 13-16.
6. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

Контрольные задания для СРС (тема 1) [1], [2], [9], [10], [12]

1. Фрактально-синергетическая концепция
2. Фрактальные карты механизмов адаптации структуры к внешнему воздействию.
3. Фрактальный анализ.
4. Синергетический анализ.

4 Методические указания для выполнения лабораторных работ

Лабораторная работа № 1. Механические свойства металлов при растяжении

Порядок выполнения работы:

1. Проверить работу привода, для чего следует нажать кнопку “ВВЕРХ”. Привод должен заработать, индикатор перемещения будет показывать ход траверсы. Нажатием кнопки “+” увеличить скорость до максимальной, затем нажатием кнопки “—” уменьшить скорость до минимальной, затем нажать кнопку “СТОП”. Обратить внимание на автоматическую остановку привода до достижения крайних положений траверсы.

2. Установить предельное усилие для данного опыта, для чего кнопками установки “+” или “—” выбрать нужное значение.

3. Измерить исходные размеры образцов. Поместить образец в захваты, для чего следует нажать обойму верхнего захвата вниз до расхождения сухарей, при необходимости переместив траверсу. Проверить надежность защелкивания захватов.

4. Обнулить показания индикатора перемещения, нажав кнопку “СБРОС”, затем установить необходимую скорость перемещения траверсы.

5. Включить режим перемещения траверсы кнопкой “ВВЕРХ”.

6. Извлечь обе половинки образца из захвата разрывной машины. Измерить конечные размеры образца.

7. Сохранить полученные диаграммы растяжения на компьютере.

8. Прodelать те же операции для образцов из других материалов. Зарисовать полученные диаграммы растяжения, результаты испытаний занести в таблицу 1.1.

Цель работы: ознакомиться с методикой проведения статических испытаний на растяжение, приобрести навыки определения прочностных и пластических свойств материалов.

1.1 Общие сведения

Под механическими свойствами понимают совокупность величин, характеризующих сопротивление материалов действию приложенных к ним внешних механических сил или нагрузок. Они подразделяются на две основные группы – прочностные и пластические.

Прочностные свойства – это характеристики сопротивления материала образца деформации или разрушению.

Пластические свойства – это характеристики способности материала образца изменять свою форму и размер. Мерой пластичности является величина остаточной деформации в момент разрушения.

В основу существующей классификации механических испытаний положены три основных признака: схема напряженного состояния (основное или линейное, двухосное – плоское, трехосное – объемное); способ нагружения (с постоянной скоростью или нагрузкой); время и характер нагружения (статические, динамические и циклические).

Для сопоставимости полученных результатов все разновидности механических испытаний стандартизированы в специальных ГОСТах, где сформулированы определения характеристик свойств, основные требования к оборудованию,

методика обработки результатов испытаний, а также приведены параметры стандартных образцов.

1.2 Испытания на растяжение

Наиболее распространенным видом испытаний является одноосное растяжение при комнатной (ГОСТ 1497-84), повышенных – до 1473°C (ГОСТ 9651-84) и пониженных от 273 до 173 К (ГОСТ 11150-84) температурах. Прочностные свойства рассчитываются на основании машинных диаграмм растяжения по положению характерных точек p , e , s , b , k (рис. 1.1) и геометрических параметров стандартных образцов (рис. 1.2). Пластические – определяются в результате сравнения размеров образцов до деформирования, и после разрушения.

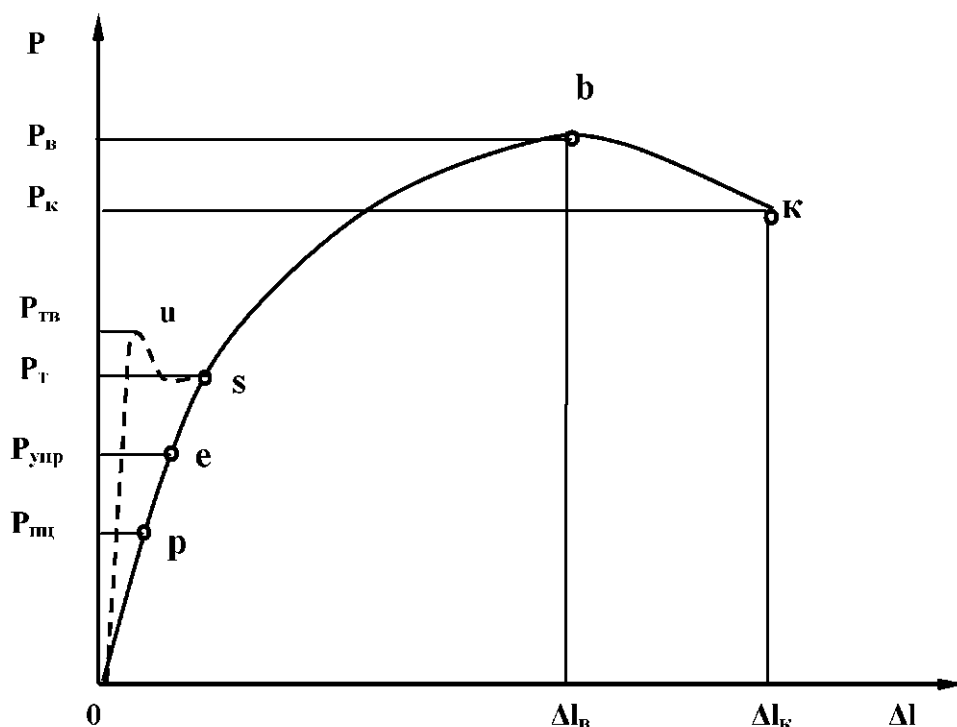


Рисунок 1.1 – Обобщенная диаграмма растяжения

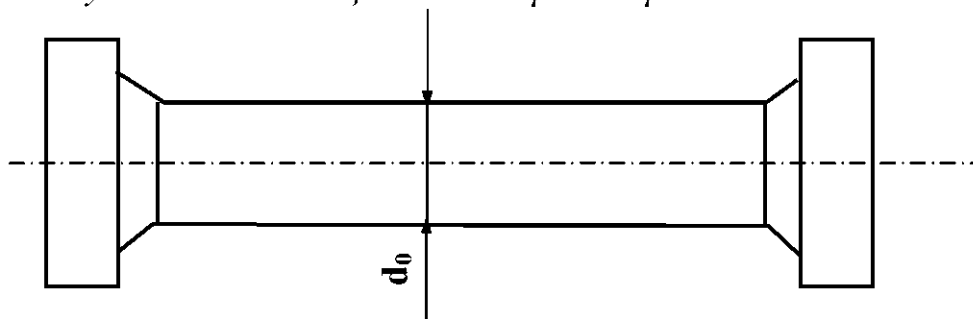


Рисунок 1.2 – Стандартный образец на растяжение

Преимущество данного метода заключается в том, что он позволяет по результатам одного эксперимента определить несколько характеристик

механических свойств: пределы пропорциональности, упругости, текучести, временное сопротивление, сопротивление разрыву, удлинение, сужение.

Пределом пропорциональности называется наибольшее напряжение, до которого деформация прямо пропорционально нагрузке

$$\sigma_{mi} = \frac{P_{mi}}{F_0}, \quad (1)$$

где P_{mi} – нагрузка, соответствующая линейному участку машинной диаграммы,
 F_0 – исходная площадь поперечного сечения образца.

Пределом упругости называется напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,05 % (иногда 0,005 %) от расчетной длины образца.

$$\sigma_{yup} = \frac{P_{yup}}{F_0}, \quad (2)$$

где P_{yup} – нагрузка, соответствующая точки p , находящейся в непосредственной близости от точки e (рис. 1.1).

Физическим пределом текучести называется напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения нагрузки:

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}, \quad (3)$$

где P_T – нагрузка, соответствующая горизонтальному участку диаграммы напряжения.

Условным пределом текучести называется напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,2 % от расчетной длины образца:

$$\sigma_{0.2} = \frac{P_{0.2}}{F_0}. \quad (4)$$

Временным сопротивлением (или пределом прочности) называется отношение максимальной за время испытания нагрузки (P_B) к первоначальной площади поперечного сечения образца (F_0):

$$\sigma_B = \frac{P_B}{F_0}. \quad (5)$$

Условным сопротивлением разрыву называется отношение нагрузки в момент разрушения P_K к первоначальной площади поперечного сечения образца:

$$\sigma_k = \frac{P_k}{F_0}. \quad (6)$$

Кроме условного сопротивления разрыву существует истинное сопротивление разрыву, которое определяется отношением нагрузки в момент разрушения к площади поперечного сечения в шейке образца после разрыва F_k :

$$\sigma_k = \frac{P_k}{F_k}. \quad (7)$$

Единицей измерения прочности свойств в системе СИ является МПа=МН/м², в технической системе единиц – кГ/мм².

Относительным удлинением образца называется отношение приращения расчетной длины образца после разрыва (I_k) к первоначальной расчетной длине (I_0), выраженное в процентах:

$$\delta = \frac{I_k - I_0}{I_0} \cdot 100\%. \quad (8)$$

Относительным сужением образца называется отношение уменьшения площади поперечного сечения образца к первоначальной площади, выраженное в процентах:

$$\Psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где F_0, F_k – площадь поперечного сечения образца до и после разрыва, соответственно.

Поскольку для реальных поликристаллических материалов определение $\sigma_{инц}$ и $\sigma_{впр}$ представляет значительные методические трудности из-за очень малых деформаций, соответствующим этим характеристикам, на практике ограничиваются измерением условного и физического пределов текучести, временного сопротивления и сопротивления разрыву.

1.3 Устройство и принцип работы универсального учебного комплекса для статических испытаний материалов КСИМ-40.

В состав комплекса входят: нагружающее устройство с приводом, датчиками усилия и перемещения траверсы; блок управления; схваты; соединительные кабели.

Нагружающее устройство (рис. 1.3) замкнутого типа с подвижной траверсой и нижней рабочей зоной. Станина 13 нагружающего устройства изготовлена из листовой стали. На станине установлены: неподвижная траверса

12, электродвигатель 15, перемещения траверсы, волновые редукторы 14, 24, шариковые винтовые передачи 9, 22, зуборемennая передача со шкивами 16.

Для управления двигателем на кронштейне установлен тахогенератор, связанный с электродвигателем посредством пассива.

К гайкам винтовых передач прикреплена подвижная траверса 8. На траверсе установлен датчик силы 20, к которому через переходник крепится активный схват 21. Пассивный схват 10 через переходник 11 крепится к неподвижной траверсе 12.

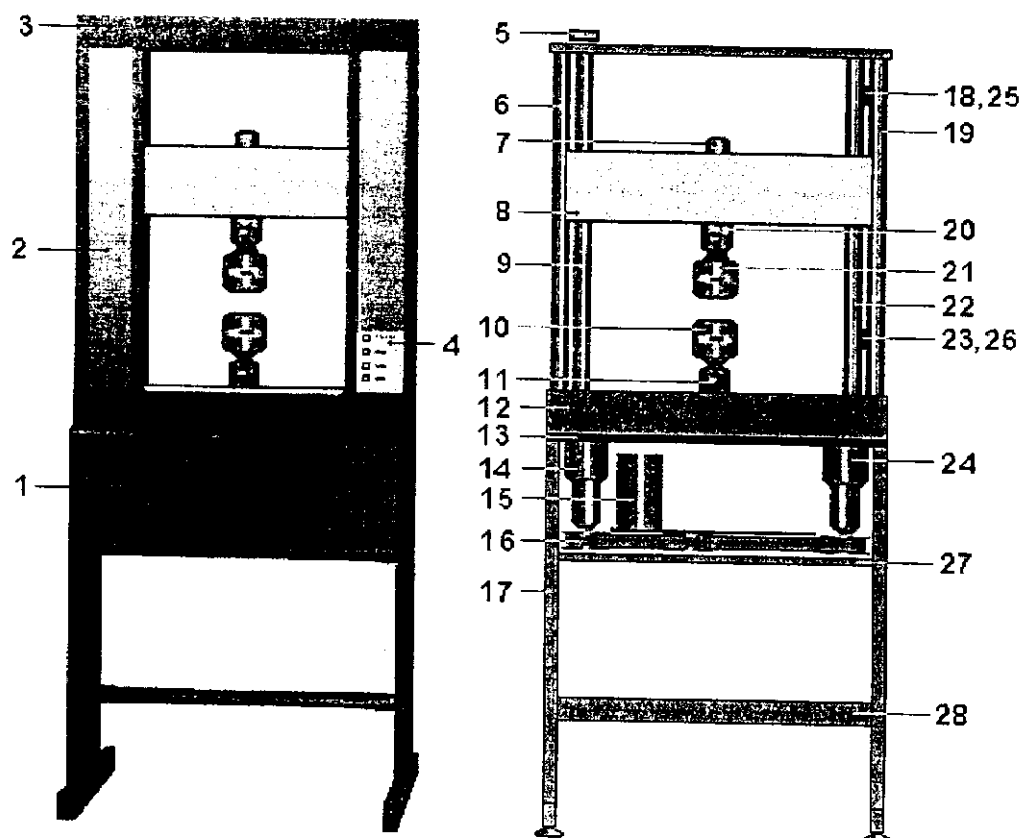


Рисунок 1.3 – Общий вид комплекса КСИМ-40

Для повышения жесткости параллельно винтам установлены стойки 6 и 19. В верхней части нагружающего устройства установлена плита, скрепляющая винты и стойки. На плите установлен датчик перемещения 5, механически связанный с винтом шариковой винтовой передачи.

Разъемы для подключения к блоку управления расположены на задней стенке. Разъем для подключения датчика силы к блоку управления расположен на подвижной траверсе.

Для повышения жесткости в нижней части нагружающего устройства установлена плита 27.

Пульт 4 местного управления установлен на правой стенке. На пульте расположены “ВВЕРХ”, “ВНИЗ”, “СТОП”, “АВАРИЙНЫЙ СТОП” и одноименные светодиоды для индикации включения соответствующего режима.

Все элементы конструкции закрываются крышками 1, 2, 3. Для защиты от пыли шариковые винтовые передачи закрыты гофрированными кожухами. Нагружающее устройство установлено на стойках 17 с регулируемыми опорами, скрепленными между собой стяжкой 28.

Привод нагружающего устройства электромеханический, выполнен на базе электродвигателя постоянного тока с устройствами, обеспечивающими регулирование и стабилизацию скорости в заданном диапазоне.

Вращающий момент двигателя через ремни и шкивы передается на волновые редукторы и прецизионные шариковые винтовые передачи, преобразующие вращательное движение двигателя в поступательное движение траверсы.

Программные и аварийные концевые выключатели 18, 23, 25, 26 предназначены для остановки траверсы при достижении верхнего и нижнего пределов движения. При этом аварийные концевые выключатели срабатывают при отказе срабатывания программных концевых выключателей.

Таблица 1.1 Результаты испытаний образцов на прочность при растяжении

Образцы	Исходные размеры образцов			Конечные размеры образцов			$\delta, \%$	$\Psi, \%$	P_{\max}	$\sigma_B, \text{МПа}$
	I_0	d_0	F_0	I_K	d_K	F_K				
Материал 1										
Материал 2										
Материал 3										

1.4 Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Общие сведения о механических свойствах.
3. Способы определения характеристик механических свойств.
4. Таблица проведенных испытаний.
5. Диаграмма растяжения.
6. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Что называется пределами пропорциональности, упругости, текучести, временным сопротивлением и сопротивлением разрыву?
2. Какие свойства называются пластическими, что они характеризуют?
3. Какие признаки положены в основу классификации механических свойств?
4. Опишите устройство и принцип работы комплекса для статических испытаний КСИМ-40.
5. В каких единицах измеряется прочность и пластические свойства материалов?

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Жуковец Н.И. Механические свойства металлов. – М.: Высшая школа, 1986. – 312 с.
4. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Механические свойства материалов». Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И., Атамбаев Ж.Н., КарГТУ, 2005 г.

Контрольные задания для СРС [1, 2, 12]

1. Диаграмма растяжения.
2. Характерные точки на диаграмме растяжения.
3. Образцы и машины для испытаний на растяжение.
4. Методика проведения испытаний на растяжение.
5. Работа пластической деформации при растяжении.

Лабораторная работа № 2 Механические свойства металлических материалов при сжатии

Порядок выполнения работы:

1. Проверить работу привода, для чего следует нажать кнопку “ВВЕРХ”. Привод должен заработать, индикатор перемещения будет показывать ход траверсы. Нажатием кнопки “+” увеличить скорость до максимальной, затем нажатием кнопки “-” уменьшить скорость до минимальной, затем нажать кнопку “СТОП”. Обратить внимание на автоматическую остановку привода до достижения крайних положений траверсы.
2. Установить предельное усилие для данного опыта, для чего кнопками установки “+” или “-” выбрать нужное значение.
3. Поместить образец в захваты, проверить надежность их защелкивания.
4. Обнулить показания индикатора перемещения, нажав кнопку “СБРОС”, затем установить необходимую скорость перемещения траверсы.
5. Включить режим перемещения траверсы кнопкой “ВНИЗ”.
6. Извлечь деформированный образец из захвата КСИМ-40.
7. Сохранить полученные диаграммы сжатия на компьютере.
8. Прodelать те же операции для образцов из других материалов. Зарисовать полученные диаграммы сжатия, результаты испытаний занести в таблицу 2.1.

Цель работы: ознакомиться с особенностями механических испытаний при сжатии и изучить особенности поведения металлов при сжатии.

2.1 Испытания на сжатие

Испытания на сжатие (ГОСТ 8817-73) дают представление о пригодности материалов к холодной или горячей деформации. Они проводятся по схеме одноосного сжатия и характеризуются большим значением коэффициента мягкости ($\alpha = 2$) по сравнению с растяжением ($\alpha = 0,5$). Поэтому испытания на сжатие применяются для оценки механических свойств относительно хрупких материалов, в частности чугуна, силуминов, керамики, интерметаллидов.

При малых деформациях сжатие можно рассматривать как растяжение с обратным знаком, поэтому расчет характеристик механических свойств проводится аналогичным образом, только в место удлинения и сужения используются укорочение ε и уширение φ :

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_k}{h_0} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где h_0 и h_k – исходная и конечная высота образца соответственно.

$$\varphi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где F_0 , F_k – площадь поперечного сечения образца до и после осадки соответственно.

При больших деформациях характеристики прочностных свойств, определяемые при сжатии и растяжении, могут отличаться друг от друга в несколько раз. Это связано с наличием трения по опорным поверхностям образца, образец приобретает бочкообразную форму, а схема напряженного состояния становится неоднородной (рис. 2.1), хотя на практике этот момент при расчете механических свойств, как правило, не учитывается. Для уменьшения сил трения используются разнообразные смазки и изготавливаются образцы специальной формы (рис. 2.2).

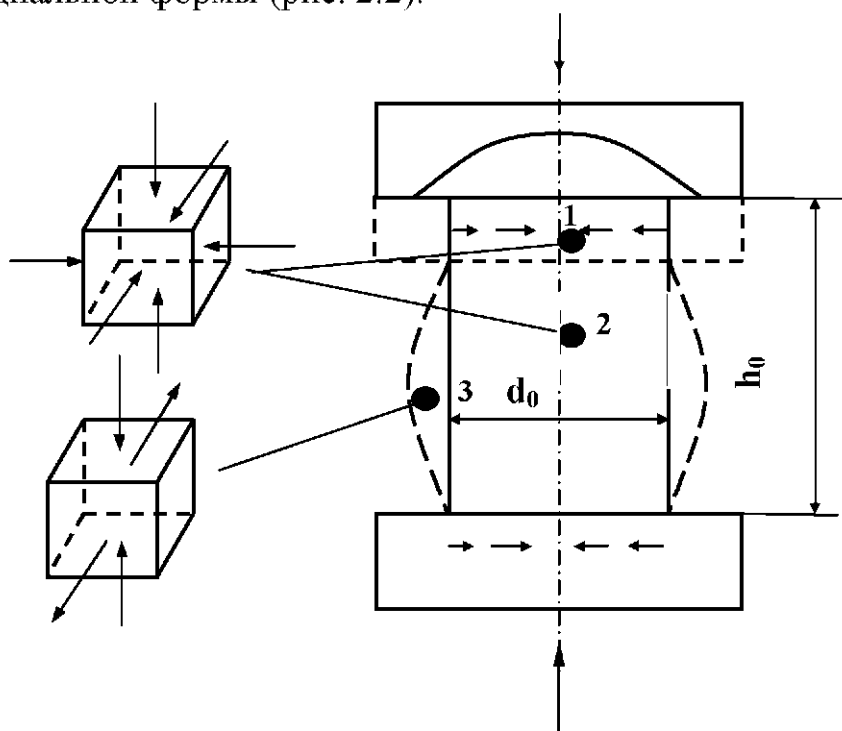


Рисунок 2.1 Схема испытания образцов на сжатие

Методика определения прочностных свойств по диаграммам сжатия полностью идентична методике, используемой при растяжении. Соотношение между высотой образца и его диаметром для сталей равняется 2:1, для цветных металлов 1,5:1 ($h=2d$ или $h=1,5d$). Испытания на осадку применяются для выявления поверхностных дефектов в образцах, а также газовых пузырей, трещин или надрывов, поскольку при сжатии они раскатываются и легко обнаруживаются.

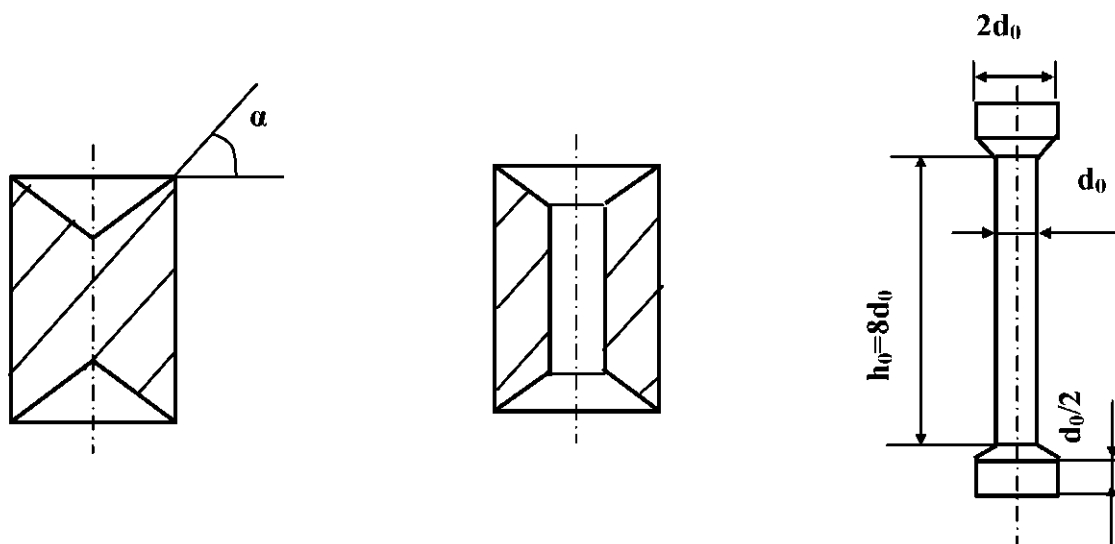


Рисунок 2.2 Формы образцов

Таблица 2.1 – Результаты испытаний образцов на прочность при сжатии

Образец	h_0 мм	d_0 мм	h_1 мм	d_1 мм	HR С	ε_1 %	φ_1 %	h_2 мм	d_2 мм	HRC	ε_2 %	φ_2 %
Материал 1												
Материал 2												
Материал 3												

2.4 Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Общие сведения об испытаниях на сжатие.
3. Определение характеристик прочности и пластичности при сжатии.
4. Таблица проведенных испытаний.
5. Диаграмма сжатия.
6. Вывод.

Контрольные вопросы:

1. Чем отличаются испытания на сжатие от испытаний на растяжение?
2. При каких условиях сжатие можно рассматривать как растяжение с обратным знаком?
3. Почему возникает бочкообразная форма образцов?
4. Что делают для уменьшения сил трения при испытаниях на сжатие?

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Жуковец Н.И. Механические свойства металлов. – М.: Высшая школа, 1986. – 312 с.
4. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Механические свойства материалов». Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И., Атамбаев Ж.Н., КарГТУ, 2005 г.

Контрольные задания для СРС [1, 2, 12]

1. Диаграмма сжатия.
2. Характерные точки на диаграмме сжатия.
3. Образцы и машины для испытаний на сжатие.
4. Методика проведения испытаний на сжатие.
5. Схемы разрушения образцов при сжатии.
6. Истинное напряжение при сжатии.

Лабораторная работа № 3 Ударная вязкость материала

Порядок выполнения работы:

1. Ознакомиться с правилами техники безопасности при работе с маятниковым копром.
2. Изучить устройство и принцип работы копра.
3. Измерить параметры образца – длину и площадь поперечного сечения в месте надреза.
4. Поднять маятник на угол 150° и закрепить его защелкой.
5. Установить образец на опоры шаблона, надрезом в сторону, противоположную удару.
6. Установить стрелку в нулевое положение шкалы и нажать кнопку “Пуск”.
7. По шкале определить величину работы удара.
8. Результаты испытаний занести в таблицу 3.1.

Цель работы: ознакомиться с методикой проведения динамических испытаний, приобрести навыки определения механических свойств при ударном нагружении.

3.1 Общие сведения

Среди многочисленных методов ударных испытаний наиболее широкое практическое применение нашел метод испытания на ударный изгиб с измерением величины ударной вязкости. Эта характеристика механических свойств играет огромную роль при оценке служебных свойств конструкционных, а также инструментальных сталей.

В процессе эксплуатации деталей могут возникнуть внешние факторы, под воздействием которых материал становится хрупким:

1. увеличение скорости деформирования (возникновение ударных нагрузок);
2. понижение температуры;
3. возникновение двухосного и трехосного напряженных состояний;
4. образование концентраторов напряжений – надрезов, раковин, трещин и т. д.

Склонность стали к хрупкому разрушению, возрастает также при повышенном содержании фосфора, концентрирующегося по границам зерен, при крупнозернистой структуре, при наличии карбидов по границам зерен, полосчатости, т. е. под влиянием целого ряда внутренних, структурных факторов.

Определение ударной вязкости при динамических испытаниях на ударный изгиб является основным практическим методом оценки склонности стали к хрупкому разрушению, которое, в отличие от вязкого, происходит без заметной пластической деформации и развивается катастрофически быстро.

Охрупчивание стали при некоторых условиях отпуска называется *отпускной хрупкостью*. Понижение ударной вязкости при этом вызвано повышением температуры перехода в хрупкое состояние. Наблюдаются два вида отпускной хрупкости. Отпускная хрупкость первого рода (необратимая) и отпускная хрупкость второго рода (обратимая), определяемые путем испытаний на ударный изгиб при комнатной температуре.

Ударная вязкость в зависимости от температуры отпуска меняется немонотонно (рис. 3.1).

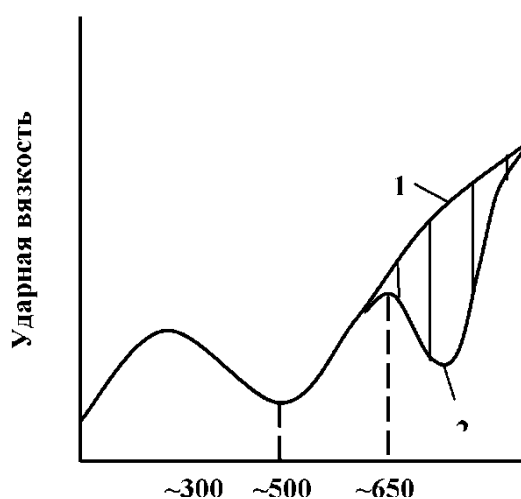


Рисунок 3.1 Зависимость ударной вязкости стали от температуры отпуска

Сталь, отпущенная в интервале температур порядка 300...350 °С, имеет минимальную ударную вязкость. Отпускная хрупкость первого рода проявляется у большинства сталей независимо от их состава и скорости охлаждения. Считают, что это явление обусловлено выделениями частиц типа цементита по границам зерен, которые при дальнейшем повышении температуры вновь растворяются. При этом менее прочные приграничные участки становятся концентраторами напряжений, т. е. хрупкое состояние обусловлено возникновением объемно-напряженного состояния, получающегося при неоднородном распаде мартенсита. Сталь в состоянии необратимой отпускной хрупкости имеет блестящий межкристаллитный излом.

Хрупкость первого рода устраняется нагревом стали выше 400 °С, снижающим твердость.

Хрупкость второго рода наблюдается в легированных сталях при охлаждении в печи или на воздухе после отпуска в интервале температур 500...550 °С или при слишком длительной выдержке в этом температурном интервале.

В стали в состоянии отпускной хрупкости второго рода уменьшается работа зарождения и особенно распространения трещины.

При быстром охлаждении в воде этот вид хрупкости не возникает, излом стали – волокнистый, характерный для вязкого состояния. После медленного охлаждения с температуры 500...650 °С сталь имеет хрупкий кристаллический излом. Хрупкость второго рода можно устранить повторным отпуском при 600...650 °С с последующим обратным быстрым охлаждением.

Хрупкость второго рода часто встречается в сталях, содержащих повышенное количество Р и As или Mn, Si, Cr или при одновременном введении в сталь Cr и Ni (или Mn).

Появление отпускной хрупкости второго рода наиболее вероятно связано с диффузией растворенных атомов некоторых элементов и насыщением поверхностных слоев зерна этими элементами без выделения избыточных мелкодисперсных фаз (карбидов, фосфидов и т. д.). Особенно большое влияние оказывает обогащение пограничных зон фосфором, снижающим работу образования межзеренных трещин, вызывающих развитие отпускной хрупкости.

Ударной вязкостью A_{II} называется величина работы, затраченная на деформацию ударным изгибом надрезанного образца, отнесенная к поперечному сечению F в месте надреза. С помощью испытаний на ударный изгиб выявляются такие дефекты как синеломкость, хладноломкость, обратимая и необратимая отпускная хрупкость и т. п.

Ударные испытания выявляют такие различия между материалами, которые не отражаются при обычных (статических) испытаниях гладких образцов. Например, значения предела прочности мало отличаются для мелкозернистого железа ($36,5 \text{ кгс/мм}^2$) и крупнозернистого железа ($34,5 \text{ кгс/мм}^2$), тогда как в значениях ударной вязкости имеется существенное различие: $13,1 \text{ кгс}\cdot\text{м/см}^2$ и $2,6 \text{ кгс}\cdot\text{м/см}^2$, соответственно.

Одно из важнейших достоинств ударных испытаний как метода оценки состояния металла – повышенная чувствительность. Так, например, колебания механических свойств около среднего значения для осевой стали (0,35 % С) составляют 99 % для A_{II} , 15 % для σ_b , 8,8 % для δ и 5,7 % для ψ .

На величине ударной вязкости часто сказывается и способ выплавки стали: электросталь имеет наибольшую, бессемеровская – наименьшую, мартеновская – промежуточную величину ударной вязкости.

Ударная вязкость в значительной мере отражает состояние поверхности образца, т. к. распределение деформации в образце неравномерно и часто бывает сосредоточено, в основном, в поверхностных слоях. Наличие твердых поверхностных слоев понижает ударную вязкость, а мягкие поверхностные слои повышают ее. Например, если надрезы на стальном образце, предназначенном для испытания на ударный изгиб, сделаны до термической обработки, то даже небольшое обезуглероживание поверхности, приводящее к образованию мягкого и пластичного феррита, может повысить ударную вязкость вдвое.

Поэтому при ударных испытаниях предписывается изготавливать надрез на ударных образцах (ГОСТ 9454-78) после их термической обработки.

Наряду с определением ударной вязкости значение имеет вид излома ударных образцов. В изломе не допускается крупнозернистость, шлаковины, расслоения и другие дефекты.

Наиболее простым из методов практического массового контроля является метод ударных испытаний при 20°C на маятниковых копрах.

Однако широкое применение нашли испытания при пониженных температурах, разработанные Н.Н. Давиденковым, так называемые “серийные испытания”.

При проведении таких испытаний делается серия опытов на ударный изгиб при постепенно понижающейся температуре до перехода металла в хрупкое состояние, причем температура резкого уменьшения ударной вязкости служит мерой качества металла. Чем ниже эта температура – “критическая температура хрупкости” – тем выше сопротивление металла хрупкому разрушению.

Охлаждающими смесями могут быть: сухая углекислота, дающая температуру -70°C , жидкий воздух дает -183°C , жидкий азот позволяет получить температуру -195°C , жидкий водород, дающий -252°C .

Применение “серийных испытаний” целесообразно только для типично хладноломких материалов с ОЦК-решеткой (Fe- α , Zn и сплавы на их основе), которые дают резкий переход в хрупкое состояние. Многие легированные стали, особенно содержащие Ni, при понижении температуры дают постепенное понижение вязкости и поэтому для них определение даже “критического интервала хрупкости” становится затруднительным. Некоторые сплавы, например Al+4 % Mg, остаются вязкими и разрушаются путем среза даже при жестких условиях (при одновременном действии удара, надреза и низкой температуры), поэтому для таких материалов применение ударных испытаний как серийных, так и при 20⁰ С нецелесообразно.

Нецелесообразно применять ударные испытания и для чугунов, литых алюминиевых и магниевых сплавов, т. к. сопротивление отрыву этих материалов достигается уже при статических нагрузках.

Таким образом, испытания на ударный изгиб являются одним из наиболее чувствительных методов контроля, чутко реагирующих на небольшие изменения состояния металла.

Ударные испытания являются ценным, а иногда необходимым дополнением к статическим испытаниям гладких образцов, главным образом для низко- и среднеуглеродистых сталей.

Для определения ударной вязкости применяют образцы специальной формы. Основной тип образца показан на рис. 3.2.

Испытания образцов на ударный изгиб проводятся на маятниковых копрах типа МК (МК-5, МК-15, МК-30 и др.), изготавливаемых по ГОСТ 10708-63. Разрушение осуществляется маятником, свободно качающимся на горизонтальной оси, укрепленной в шарикоподшипниках на стойках копра.

Образец устанавливают на нижних опорах копра симметрично относительно опор и так, чтобы надрез был обращен в сторону, противоположную направлению удара (рис. 3.3).

Испытания на ударную вязкость или ударный изгиб (КС) проводятся для оценки надежности и работоспособности материалов в условиях динамического нагружения и их склонности к хрупкому разрушению, которые, в свою очередь, зависят от скорости изменения нагрузки и “мягкости” напряженного состояния. Поскольку вязкость (в том числе ударная) является интегральной характеристикой, зависящей одновременно от прочности и пластичности, то она более резко реагирует на изменения структурного состояния материалов, чем другие свойства, что особенно ярко проявляется при пониженных температурах.

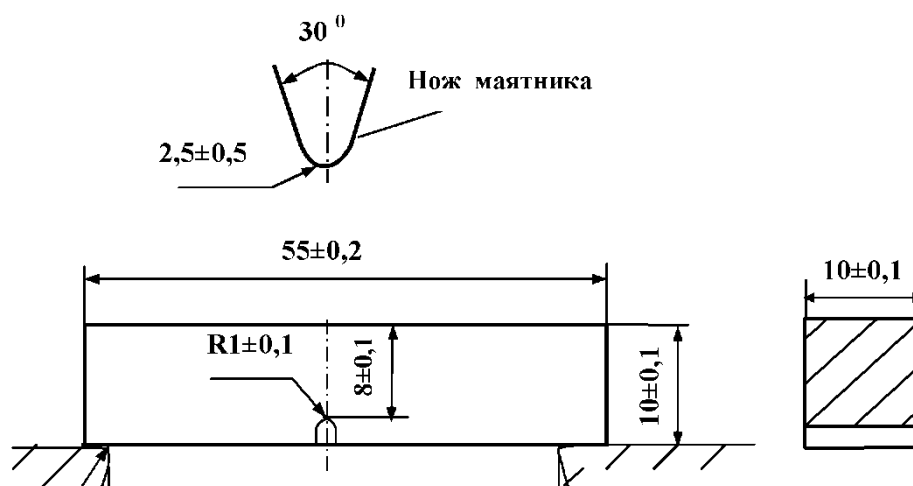


Рисунок 3.2 – Форма и размеры образца для испытаний на ударную вязкость

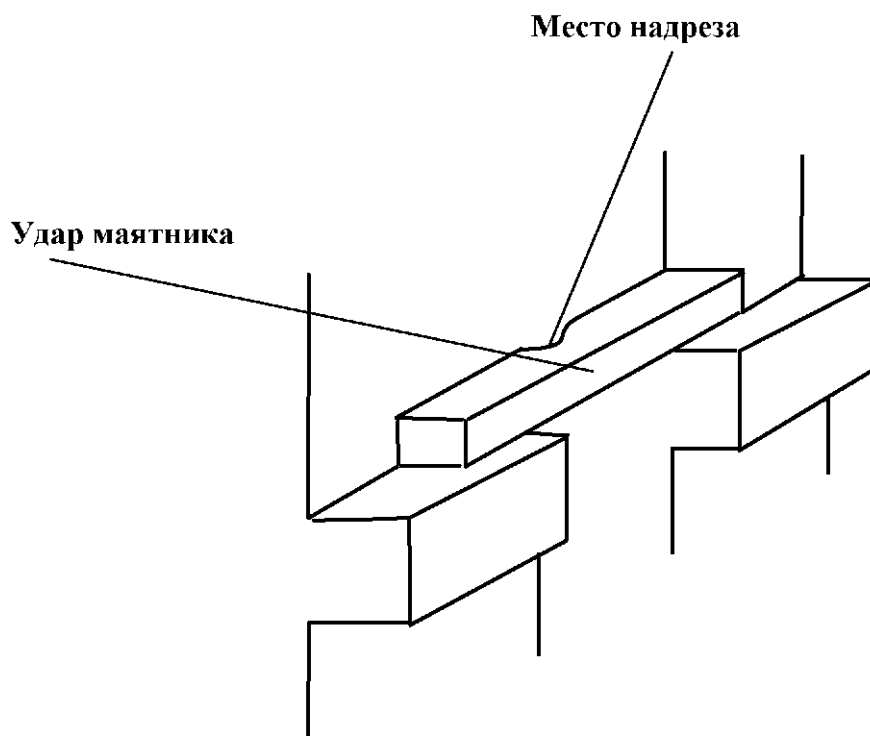


Рисунок 3.3 Схема расположения образца на опорах копра

При динамических испытаниях не соблюдается принцип подобия, поэтому они жестко унифицированы как по параметрам образцов, так и по условиям проведения экспериментов (ГОСТ 9454-78). Их проводят на маятниковых копрах (рис. 3.4) с использованием стандартных образцов с разной формой надрезов – U, V, T, копер состоит из тяжелого маятника, свободно качающегося на его оси, и специального шаблона, обеспечивающего установку надреза строго в середине пролета ножа маятника между опорами. При этом удар маятника производится со стороны, противоположной надрезу.

Согласно ГОСТ 9454-78 в качестве основного используется образец с U-образным надрезом, но в отдельных случаях применяются также образцы и с другой формой надрезов. V-образный выполняется с углом при вершине 45° и радиусом закругления 0,25 мм, а роль T-образного надреза играет созданная на специальном приборе усталостная трещина. В соответствии с этим при записи

ударной вязкости (КС) в ее обозначение вводится третья буква, указывающая вид надреза – КСУ, КСV, КСТ.

Параметром КСV оценивается пригодность материалов для сосудов давления, трубопроводов и других конструкций повышенной надежности. Параметр КСТ характеризует работу развития трещины при ударном изгибе и оценивает способность материала тормозить начавшееся разрушение. Он учитывается при выборе металлов и сплавов для конструкций особо ответственного назначения (летательные аппараты, роторы турбин и т. п.)

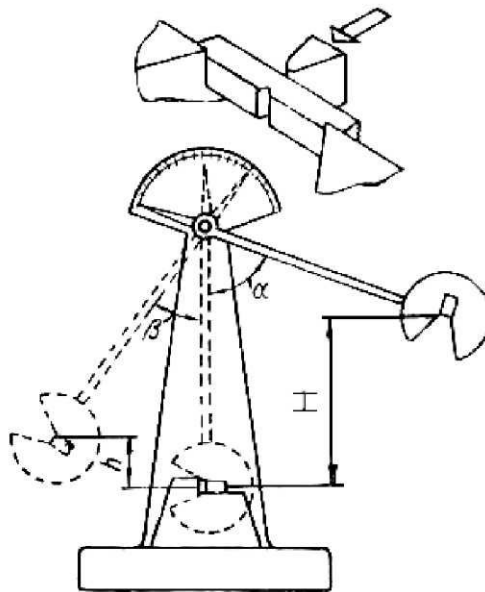


Рисунок 3.4 – Схема ударного изгиба на маятниковом копре

3.2 Методика определения ударной вязкости

Разрушение образца осуществляется за счет потенциальной энергии падающего маятника при отклонении его из положения равновесия на угол α или высоту H (рис. 3.4). Общий запас энергии расходуется на изгиб и разрушение образца, а также последующий взлет маятника на высоту h , соответствующую углу отклонения β . Величина работы, затраченная на излом образца K , определяется из разности энергии маятника в положении его до и после удара:

$$K = P \cdot (H - h), \quad (12)$$

где P – вес маятника,

H – первоначальная высота подъема маятника,

h – высота взлета маятника после удара.

Вес маятника измеряется в ньютонах или килограммах, высота в метрах.

Если длина маятника L , то

$$h = L \cdot (1 - \cos \beta), \quad H = L \cdot (1 - \cos \alpha). \quad (13)$$

Отсюда

$$K = P \cdot L \cdot (\cos \beta - \cos \alpha), \quad (14)$$

где P и L для данного копра – величины постоянные.

Углы α и β определяются по шкале прибора, однако на практике для каждого угла β величина работы определяется по специальным таблицам или шкала копра может быть проградуирована в единицах работы, если угол подъема маятника α фиксирован. Обычно он равен 150° .

Зная полную работу излома и разрушения K , можно рассчитать основную характеристику динамических испытаний – ударную вязкость a_{11} . Ударная вязкость – это работа, израсходованная на ударный излом образца, отнесенная к площади его поперечного сечения в месте надреза:

$$a_{11} = \frac{K}{F}, \quad (15)$$

где F – площадь сечения в месте надреза, см^2 .

Таблица 3.1 Результаты испытаний образцов на ударную вязкость

Материал	Размеры образца		F, см^2	K, Дж	a_{11} , Дж/ м^2
	a, см	b, см			

Стандартная размерность ударной вязкости $\text{МДж}/\text{м}^2$ или $\text{МДж}/\text{см}^2$. Ударные испытания, как и статические, проводятся при отрицательных и повышенных температурах. Диаграмма деформации обычно не записывается т.к. это связано с большими экспериментальными трудностями, поскольку время испытания исчисляется долями секунды.

Контрольные вопросы:

1. В каких случаях проводятся испытания на ударную вязкость?
2. Какие существуют методы определения работы удара?
3. Что такое ударная вязкость, и в каких единицах она измеряется?
4. В чем состоит принцип работы маятникового копра?
5. Для каких целей используются параметры KCV и KCT?
6. Какие материалы подвергаются испытаниям на ударную вязкость?
7. В чем сходство и различие статических и динамических испытаний?

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.

3. Жуковец Н.И. Механические свойства металлов. – М.: Высшая школа, 1986. – 312 с.

4. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Механические свойства материалов». Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И., Атамбаев Ж.Н., КарГТУ, 2005 г.

Контрольные задания для СРС [1, 2, 12]

1. Особенности пластической деформации и разрушения при динамическом нагружении.

2. Температурный запас вязкости.

3. Полная работа при динамических испытаниях.

4. Схема напряжения, возникающая в образце при динамических испытаниях.

5. Оборудование для испытаний на ударную вязкость.

Лабораторная работа № 4 Испытания металлов на твердость

Порядок выполнения работы на приборе Бринелля:

1. Изучить устройство и принцип работы твердомера ТБ 5004.

2. Ознакомиться с образцами для испытания (размер зерен, черные, цветные металлы, толщина образцов, и др.) и подготовить их для испытания.

3. Выбрать по таблице 4.1 диаметр шарика, величину нагрузки и время нагружения.

4. Снять оправку со шпинделя и установить необходимый индентор.

5. С помощью наборов грузов подобрать требуемую нагрузку.

6. На опорный столик установить испытуемый образец так, чтобы центр отпечатка располагался от края образца на расстоянии не меньше $2,5d$.

7. С помощью маховика подвести образец до касания с индентором (должен включиться тормоз).

8. Нажав кнопку “пуск”, произвести нагружение.

9. По истечении установленного времени нагружения нажать кнопку “стоп”.

10. С помощью маховика отвести столик с образцом от индентора.

11. Операции по п. п.6-11 повторить не менее трех раз на каждом образце.

12. Измерить диаметры отпечатков в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью измерительной лупы.

13. Рассчитать НВ по формуле (20).

Результаты испытаний занести в таблицу 4.2.

Порядок работы на приборе Роквелла:

Порядок работы на приборе следующий:

1. Установить соответствующий индентор и выбрать необходимую нагрузку.

2. Поместить образец на столик и вращением маховика вдавить индентор в образец предварительной нагрузкой, при этом малая стрелка индикатора должна стать против красной точки, а большая – на нуль черной шкалы (А, С) индикатора или на 30 красной шкалы (В).

3. Нажать пусковую педаль и произвести нагружение основной нагрузкой в течение 3...6 секунд.

4. Опустить пусковую педаль и снять основную нагрузку через 1...3 секунды после остановки большой стрелки.

5. Считать число твердости с точностью до половины цены деления шкалы.

6. Повторить испытания не менее 3...5 раз, выдерживая расстояние между отпечатками не менее 3 мм.

Результаты измерений занести в таблицу 4.4.

Цель работы: освоить принципы работы твердомеров типа ТВ 5004 (Бринелль) и ТК (Роквелл) и приобрести навыки определения твердости материалов по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу.

4.1 Общие положения

Твердостью называется свойство материала оказывать сопротивление проникновению в него другого более твердого тела (индентора), не испытывающего остаточной деформации. Измерение твердости является одним из самых распространенных и доступных методов механических испытаний, который широко используется в исследовательских целях и как средство (способ) контроля качества свойств материалов в производстве. В отличие от других испытаний на твердость очень разнообразны и отличаются друг от друга по форме используемого индентора, условиям приложения нагрузки, способам расчета величины твердости, времени нагружения и т. д. В зависимости от этих факторов твердость может характеризовать упругие и упруго-пластические свойства, сопротивление малым или большим деформациям, а также разрушению. Общим моментом для них является приложение нагрузки при контакте индентора и испытываемого материала.

Оценивается твердость так называемыми числами твердости, размерность которых определяется принципом измерения. Числа твердости являются вторичными, производными характеристиками механических свойств, зависящими от первичных, основных – модуля упругости, временного сопротивления и др., от продолжительности действия нагрузки, от способа испытаний и вычисления твердости. Поэтому сравнимые результаты, даже в пределах одного метода, получаются при строгой регламентации процедуры испытаний, которая часто определяется стандартом.

В настоящее время существует около 30 разновидностей испытаний на твердость, но наибольшее распространение получили три из них – это методы измерения твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу, а также метод измерения микротвердости. Во всех случаях контакт осуществляется вдавливанием индентора определенной формы и размера со степенью

деформации 30...40 %. При этом реализуется состояние всестороннего неравномерного сжатия с коэффициентом “мягкости” $\alpha > 2$, что позволяет производить оценку твердости практически любых, в том числе и очень хрупких материалов.

В качестве механической характеристики величина твердости служит основой для выбора допустимых напряжений в расчетах на контактную прочность. Она также служит для косвенного суждения с определенной точностью о других характеристиках материала – пределе текучести, временном сопротивлении, склонности к ползучести и др. Испытания на твердость менее сложны и не дорогостоящи: они позволяют определять механические свойства и в небольших объемах, допускают текущий контроль изделий в процессе производства и эксплуатации, не влияют на их работоспособность и, что особенно ценно, относятся к неразрушающим методам механических испытаний.

4.2 Требования к образцам для измерения твердости

1. Поверхность образца должна быть плоской т. к. на выпуклой поверхности индентор вдавлируется в материал на большую глубину, чем на плоской.

2. Поверхность образца должна быть горизонтальной, и не иметь каких – либо дефектов (окалина, выбоины, грубые царапины, посторонние покрытия). Чем меньше глубина вдавливания, тем выше требования к чистоте поверхности.

3. При подготовке образца недопустим разогрев или наклеп поверхностных слоев при шлифовании или полировке.

4.3 Требования к режиму нагружения

1. Нагрузку необходимо прикладывать плавно, чтобы исключить возникновение динамических эффектов, что особенно важно при измерении микротвердости.

2. Время выдержки под нагрузкой не должно превышать определенной величины, чтобы избежать проявления эффектов ползучести.

3. Минимальная толщина образца должна быть не меньше десятикратной глубины отпечатка, чтобы исключить продавливание образца насквозь.

4. Расстояние до краев образца и между соседними отпечатками должно быть таким, чтобы не допустить влияния краевых эффектов и пластически деформированных зон вокруг отпечатков друг друга.

5. Величина нагрузки должна быть такой, чтобы размер отпечатка превышал размер элементов структуры материала – зерен, колоний, включений фаз и др. (кроме микротвердости).

4.4 Определение твердости по Бринеллю

Измерение твердости по методу Бринелля осуществляется на твердомере типа ТВ 5004 в соответствии с ГОСТом 23677-79. В качестве индентора применяются шарики диаметром 2,5; 5,0 и 10 мм, изготовленные из термически обработанной высокоуглеродистой стали с чистотой поверхности по

двенадцатому классу (ГОСТ 2789-73). Выбор диаметра шарика, нагрузки и времени нагружения производится по таблице 4.1.

Показателем твердости является число твердости по Бринеллю, обозначаемое HB и представляющее собой отношение усилия P к площади поверхности шарового сегмента F :

$$HB = \frac{P}{F}, \quad (16)$$

$$F = \pi \cdot D \cdot h, \quad (17)$$

где h – глубина отпечатка, мм,
 D – диаметр шарика, мм.

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}, \quad (18)$$

где d – диаметр отпечатка, мм.

Отсюда

$$F = \frac{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}. \quad (19)$$

Тогда число твердости HB рассчитывается по формуле:

$$HB = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}. \quad (20)$$

Твердость по Бринеллю выражается в кГ/мм^2 , но по стандарту размерность обычно не записывается. В то же время в системе СИ она указывается – МПа. Верхний предел измерения твердости этим методом составляет $HB\ 450$, так как при испытании более твердых материалов происходит деформация шарика, превышающая стандартизированный допуск.

Сопоставимые результаты на одном образце при использовании шариков разного диаметра получаются при постоянных отношениях $\frac{P}{D}$ и $\frac{d}{D}$, т. к. это обеспечивает выполнение условий подобия деформаций. На практике отношение $\frac{d}{D}$ поддерживается в пределах $0,2 \dots 0,6$, а $\frac{P}{D}$ в зависимости от твердости материалов равно 30 (при $HB > 130$), и $2,5$ ($HB < 35$).

4.5 Устройство и принцип работы прибора Бринелля

На рис. 4.1 приведена принципиальная схема твердомера ТБ 5004. Основными частями прибора являются:

1. Шпиндель 6, в который вставляются сменные инденторы с шариками разного диаметра.
2. Подвеска 18 с набором грузов.
3. Маховик 1, перемещающий опорный столик 5 с образцом в вертикальном направлении.
4. Система рычагов 12, 15, 17-19, передающих нагрузку на испытуемый образец.

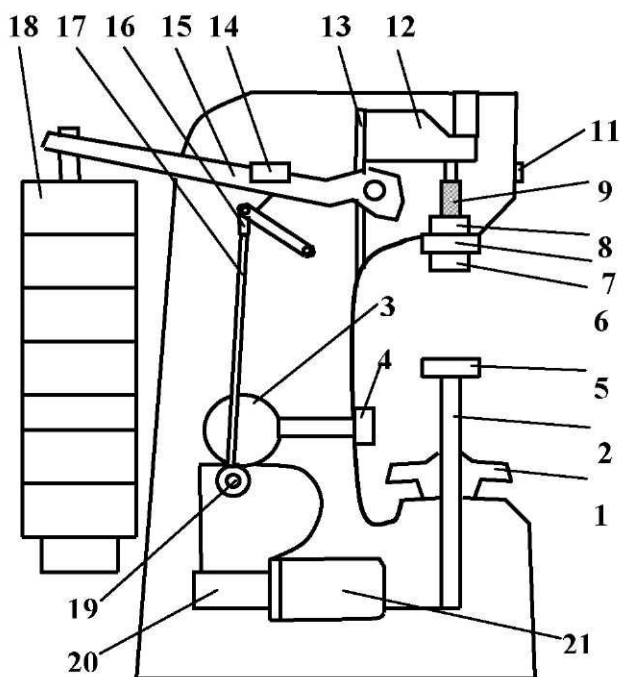


Рисунок 4.1 – Схема прибора для определения твердости по Бринеллю

5. Электродвигатель 21, обеспечивающий работу прибора.
6. Пульт управления с переключателями режима работы, сигнальными лампами “контроль”, “выдержка”, “сеть”, реле времени.
7. Кнопки “пуск” и “стоп”.

Таблица 4.1 – Определение твердости различных материалов методом Бринелля

Материал	Интервал чисел твердости по Бринеллю, НВ	Толщина испытуемого образца, мм	Диаметр шарика, мм	Нагрузка, кН	Выдержка под нагрузкой, с
Черные металлы	130...450	От 6 до 3 вкл.	10	29420	От 10 до 15
		От 4 до 2 вкл.	5	7355	
		Менее 2	2,5	1839	
	140 и менее	Более 6	10	9807	
Цветные металлы и	130 и более	От 6 до 3 вкл.	10	29420	От 10 до 180
		От 4 до 2 вкл.	5	7355	

сплавы (медь, латунь, бронза и т.д.)	35...130	Менее 2	2,5	1839	
		От 9 до 3 вкл.	10	9807	
		От 6 до 3 вкл.	5	2452	
Цветные металлы и сплавы (алюминий, подшипниковые сплавы и т.д.)	8...35	Более 6	10	2452	
Олово, свинец	4...20	Более 6	10	981	
Алюминий, магний и их сплавы	16...100	От 6,4 до 1 вкл.	10	4903	
				1226	
Титан губчатый	ГОСТ 9853.8-79		10	14710	30

Таблица 4.2 – Результаты испытаний образцов на твердость

№ пп	Материал	Условия испытания			Диаметр отпечатка, мм			Твердость, НВ	
		нагрузка	диаметр шарика	время нагружения	d_1	d_2	d_{cp}	по формуле	по Виккерсу

4.6 Определение твердости по Роквеллу

Метод Роквелла был предложен в 1920 г. и в настоящее время получил самое широкое распространение. Это объясняется, во-первых, упрощенной процедурой определения твердости, когда число твердости считается непосредственно со шкалы прибора, а во-вторых, его универсальностью – с его помощью можно испытывать массивные и тонкие образцы из твердых и мягких материалов. В качестве индентора используется алмазный конус с углом при вершине 120° и радиусом закругления 0,2 мм и стальной шарик диаметром 1,5875 мм (1/16 дюйма). Процесс нагружения осуществляется под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок – предварительной $P_0=98$ Н (10кГс) и общей P_1 .

$$P = P_0 + P_1. \quad (21)$$

Предварительная нагрузка подается вручную и не снимается до конца испытаний, что обеспечивает повышенную точность измерений, т. к. исключается влияние вибраций и поверхностного слоя.

Число твердости по Роквеллу (HR) измеряется в условных единицах и является мерой глубины вдавливания индентора под определенной нагрузкой считанное по индикатору прибора. Перемещение основной стрелки индикатора

на одно деление шкалы соответствует перемещению индентора на 0,002 мм. Это число и принимается за единицу твердости. При измерении алмазным конусом используются шкалы *A* и *C*, имеющие 100 делений, а твердость вычисляется по формуле:

$$HRA \text{ или } HRC = 100 - \frac{H - h}{0,002}. \quad (22)$$

В случае шкалы *A*: $P_0 = 10 \text{ кгс}$, $P_1 = 50 \text{ кгс}$, $P = 60 \text{ кгс}$, шкалы *C* – $P_0 = 10 \text{ кгс}$, $P_1 = 140 \text{ кгс}$, $P = 150 \text{ кгс}$.

При измерении стальным шариком используется шкала *B*, имеющая 130 делений, твердость вычисляется по формуле:

$$HRB = 130 - \frac{H - h}{0,002}. \quad (23)$$

В этом случае $P_0 = 10 \text{ кгс}$, $P_1 = 90 \text{ кгс}$, $P = 100 \text{ кгс}$. Шкала *B* применяется для измерения твердости не закаленной стали, бронзы, латуней и других нетвердых материалов. Для твердых – например, закаленные стали, используется шкала *C*, вдавливание осуществляется алмазным конусом под нагрузкой 1470 Н (150 кгс). Испытания очень твердых материалов и тонких поверхностных слоев также осуществляется алмазным конусом, но по шкале *A* под нагрузкой 588 Н (60 кгс). К достоинствам метода относится простота определения твердости, высокая производительность, возможность полной автоматизации процедуры испытаний. К недостаткам – многошкальность, отсутствие геометрического подобия отпечатков, условность и безразмерность величины HR, сравнительно низкая чувствительность. Все эти факторы делают метод Роквелла лишь средством быстрого упрощенного технического контроля.

4.7 Устройство прибора Роквелла

На рис. 4.2 приведена принципиальная схема твердомера Роквелла. Основными его частями являются: поперечина 1, подвеска 2, шток амортизатора 3, рычаг 4, рукоятка 5, винт 6, крышка 7, рычажок 8, призма 9, шпиндель 10 с закрепленным на его конце индентором, маховик 11 для перемещения образца, шпонка 12, направляющая втулка 13, станина 14, грузы 15, стойка 16, подъемный винт 17, масляный амортизатор 18, пружина 19, индикатор с двумя шкалами – черной (*C*) и красной (*B*). При этом с большой стрелкой индикатора всегда совмещается нуль черной шкалы, и ни в коем случае – красной. Барабан для точной установки шкалы индикатора на нуль, электромотор, обеспечивающий работу прибора.

Перевод значений твердости HR в HB провести по таблице 4.3.

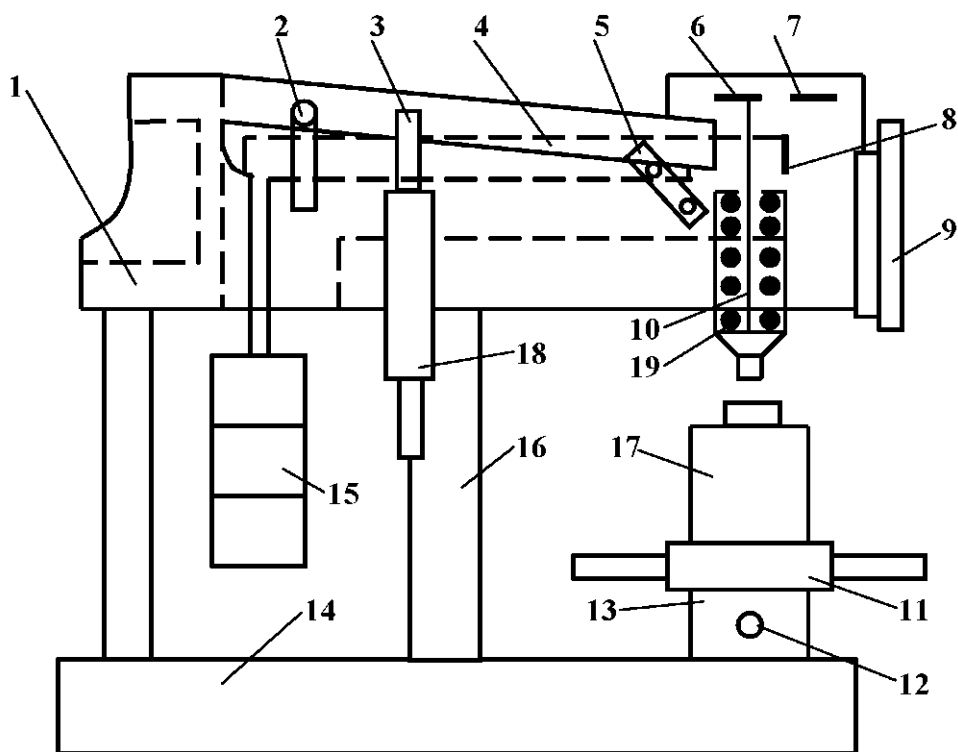


Рисунок 4.2 – Прибор для измерения твердости по Роквеллу

Таблица 4.4 – Результаты измерений твердости по Роквеллу

№	Материал	Условия испытания			Измерения			Среднее значение	НВ (перевод)
		нагрузка, Н	вид индентора	шкала	I	II	III		

4.8 Определение твердости по Виккерсу (ГОСТ 2999-59)

Испытание твердости по Виккерсу производится путем вдавливания четырехгранной алмазной пирамиды с углом при вершине $\alpha=136^{\circ}$. В зависимости от твердости и толщины металла применяют нагрузки 1, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 100 и 120 кгс. Поверхность образца должна быть отполирована. Твердость определяется, как и при способе Бринелля, делением нагрузки P на площадь поверхности отпечатка с диагональю d :

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin \alpha / 2}{d^2} = 1,8544 \frac{P}{d^2}. \quad (24)$$

Числа твердости по Бринеллю и по Виккерсу имеют одинаковую размерность ($\text{кгс}/\text{мм}^2$) и до НВ 350...400 их величины совпадают между собой. При НВ больше 400 твердость по Бринеллю оказывается заниженной. Для

получения точных результатов при измерении твердости по Виккерсу необходимо строго соблюдать следующие условия:

- 1) отношение толщины образца к диагонали отпечатка должно быть не менее 1,5;
- 2) отношение глубины отпечатка к его диагоналям – 1/7;
- 3) расстояние между центром и краем образца, а также краем соседнего отпечатка должно быть не менее 2,5 диагоналей отпечатка;
- 4) испытания проводить на тщательно отшлифованной или полированной поверхности.

На приборе Виккерса можно измерять твердость образцов толщиной до 0,3...0,5 мм или поверхностных слоев толщиной до 0,03...0,05 мм. Однако следует учитывать, что при небольшой нагрузке (1 кгс) отпечаток пирамиды может быть недостаточно отчетливым. Поэтому при измерении твердости очень тонких поверхностных слоев, например, цианированного слоя толщиной 0,04...0,06 мм, лучше применять нагрузку 5 кгс, а для измерения твердости азотированного слоя стали толщиной до 0,05 мм – нагрузку 5 или 10 кгс. При обозначении твердости по Виккерсу указывают величину применяемой нагрузки:

Таблица 4.3 – Перевод чисел твердости

Твердость по Роквеллу		Твердость по Виккерсу	Твердость по Бринеллю, НВ	Твердость по Роквеллу по шкале В	Твердость по Бринеллю, НВ
По шкале С	По шкале А				
70	86,5	1076	-	100	240
69	86,0	1004	-	99	234
68	85,5	942	-	98	228
67	85,0	894	-	97	222
66	84,5	854	-	96	216
65	84,0	820	-	95	210
64	83,5	789	-	94	205
63	83,0	763	-	93	200
62	82,5	739	-	92	195
61	81,5	715	-	91	190
60	81,0	695	-	90	185
59	80,5	675	-	89	180
58	80,0	655	-	88	176
57	79,5	636	-	87	172
56	79,0	617	-	86	169
55	78,5	598	-	85	165
54	78,0	580	-	84	162
53	77,5	562	-	83	159
52	77,0	545	-	82	156
51	76,5	528	-	81	153

50	76,0	513	-	80	150
49	75,5	498	-	79	147
48	74,5	485	-	78	144
47	74,0	471	448	77	141
46	73,5	458	437	76	139
45	73,0	446	425	75	137
44	72,5	435	415	74	135
42	71,5	413	393	72	130
40	70,5	393	372	70	125
38	-	373	352	68	121
36	-	353	332	66	117
34	-	334	313	64	114
32	-	317	297	62	110
30	-	301	283	60	107
28	-	285	270		
26	-	271	260		
24	-	257	250		
22	-	246	240		
20	-	236	230		

HV5, HV10 и т. д. При испытании твердых и других слоев (азотированного, цианированного) около углов отпечатка иногда появляются трещины, по виду которых можно судить о хрупкости исследуемого слоя.

Несмотря на преимущество метода Виккерса, дающего возможность измерять как мягкие, так и твердые материалы различной толщины, измерение твердости занимает много времени и требует тщательной подготовки поверхности. Указанный недостаток препятствует широкому применению данного метода в условиях массового контроля.

4.9 Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Основные положения.
3. Краткие характеристики методов Бринелля, Роквелла и Виккерса.
4. Способы определения твердости HB, HV и HR.
5. Таблицы с полученными результатами.
6. Вывод по работе.

Контрольные вопросы:

1. Что называется твердостью?
2. К каким методам относятся испытания на твердость?
3. В каких единицах измеряется твердость по Бринеллю, Виккерсу и Роквеллу?
4. В чем состоят достоинства и недостатки обоих методов?
5. Как определяется твердость по Бринеллю, Виккерсу и Роквеллу?

6. Почему используются разные инденторы?
7. Для чего применяется предварительное нагружение в методе Роквелла?
8. Как работает индикатор твердомера Роквелла?

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Жуковец Н.И. Механические свойства металлов. – М.: Высшая школа, 1986. – 312 с.
4. Колмаков А.Г. Методы измерения твердости. – М.: Интермет Инжиниринг, 2000. – 412 с.
5. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Механические свойства материалов». Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И., Атамбаев Ж.Н., КарГТУ, 2005 г.

Контрольные задания для СРС [1, 2, 6, 12]

1. Физический смысл твердости материалов.
2. Схема напряженного состояния в зоне деформации при определении твердости.
3. Диаграмм пластического вдавливания шарового индентора.
4. Схема прибора для определения твердости по Бринеллю.
5. Схема прибора для определения твердости по Виккерсу.
6. Схема прибора для определения твердости по Роквеллу.

Лабораторная работа № 5 Определение твердости с помощью твердомера МЕТ-Д1

Порядок проведения работы:

Произвести несколько измерений в различных шкалах твердомера МЕТ-Д1. Внести полученные результаты в архив прибора. С помощью МЕТ-Д1 провести обработку результатов. Полученные данные записать в таблицу 5.1.

Цель работы: изучить устройство прибора МЕТ-Д1 и приобрести навыки определения твердости различными шкалами прибора МЕТ-Д1.

5.1 Устройство твердомера МЕТ-Д1

Твердомер представляет собой портативный прибор, состоящий из электронного блока и динамического датчика.

А. Датчик, включающий в себя ударный механизм, формирует напряжение, пропорциональное скорости перемещения индентора. Он представляет собой отдельно выполненное механическое устройство, связанное с электронным блоком при помощи кабеля. Его подвижная часть (индентор) при

помощи предварительно взведенной пружины сбрасывается при нажатии спусковой кнопки на контролируемую поверхность. На конце индентора расположен твердосплавный шарик, непосредственно контактирующий с контролируемой поверхностью. При этом индентор (внутри которого находится постоянный магнит) перемещается внутри катушки индуктивности и своим магнитным полем наводит в катушке электродвижущую силу. Напряжение с выхода катушки индуктивности подается на вход электронного блока, где преобразуются в числа твердости выбранной шкалы и индицируются на дисплее.

Б. Электронный блок твердомера встроен в пластмассовый корпус. На лицевой стороне корпуса расположены жидкокристаллический индикатор – ЖКИ (дисплей) и четыре функциональных клавиши. На верхней стороне корпуса расположены разъемы датчика и внешнего питания (зарядного устройства). Батарейный отсек находится на обратной стороне прибора. Аккумулятор устанавливается в отсеке согласно обозначенной полярности. Прибор может также питаться от сети 220В 50Гц через сетевой блок питания, одновременно подзаряжающий аккумулятор.

В. Функциональная схема твердомера, поясняющая принцип действия, приведена на рис. 5.1.

Схема питания твердомера содержит аккумулятор (1), преобразователь-стабилизатор напряжения (2) и супервизор первичного питания (3). Процессорная секция состоит из микроконтроллера (4), буфера интерфейса RS232 (5) и энергонезависимой памяти (EEPROM) (6). Модуль индикации и клавиатуры содержит графический матричный ЖКИ (7) и четырехкнопочную клавиатуру (8). Модуль датчика (9) состоит из корпуса, индентора и ряда вспомогательных элементов. К аккумулятору (1) может быть подключен сетевой блок питания (10).

Г. Программное обеспечение микроконтроллера состоит из измерительной части, интерфейсных и обрабатывающей программ. Измерительная часть вместе с интерфейсной программой написана на языке “Ассемблер-51”. Она находится в EEPROM микропроцессора 89C55.

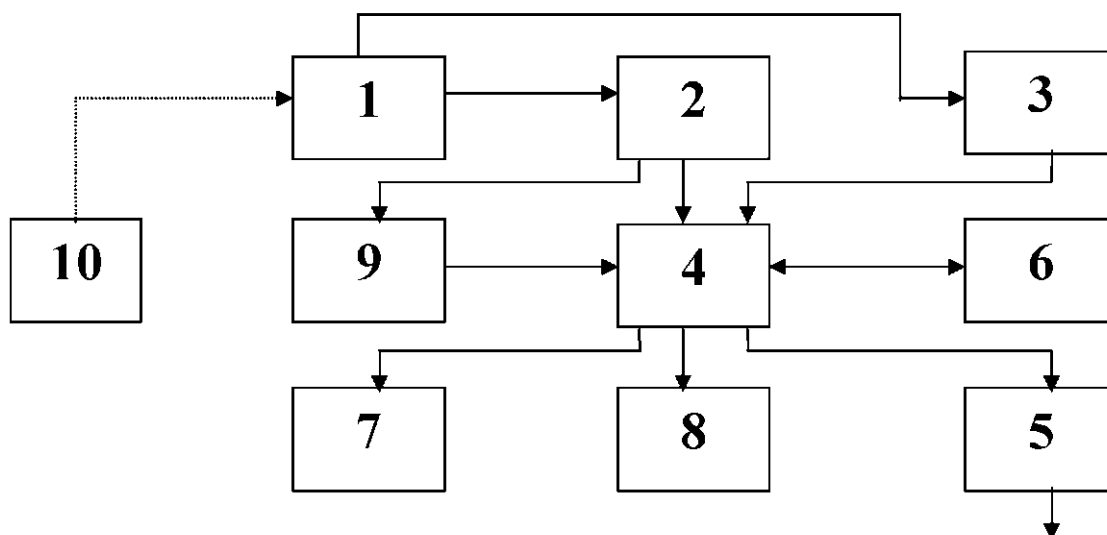


Рисунок 5.1 – Схема функциональная твердомера МЕТ-Д1

Дисплей индицирует три типа надписей: служебные, подсказки и числа. Служебные надписи и символы позволяют индицировать текущий режим работы твердомера, подсказки (мигающие надписи и звуковой сигнал) – помогают выбрать следующий режим работы, числа – показывают значения параметров.

Д. Схема работы твердомера представляет собой трехуровневое меню, на каждом уровне которого возможен выбор режимов работы или параметров (рис. 5.2).

5.2 Принцип работы твердомера МЕТ-Д1

При включении твердомера оператор выбирает рабочую шкалу, режим работы и приступает к измерениям. Четыре клавиши позволяют оператору проходить по уровням меню вверх-вниз и вправо-влево. На верхнем уровне меню появляется мигающая надпись “ШКАЛА: ХХХ”, где ХХХ – выбираемая шкала (HRC, HB, HV, HSD, R_m , H_1 , H_2 , H_3).

По шкале R_m определяется предел прочности по ГОСТ 22761-77 для малоуглеродистых сталей перлитного класса. В отличие от остальных шкал, шкалы H_1 , H_2 , H_3 не калибруются изготовителем на серийных приборах. Они предусмотрены для измерений по другим шкалам твердости, а также на чугунах, алюминиевых, медных сплавах и других материалах, существенно отличающихся от сталей по свойствам, что требует калибровки твердомера на специальных образцах, поставляемых потребителем.

Клавишами ← “влево” и → “вправо” выбирают необходимую шкалу. Клавишей ↓ “вниз” оператор переходит на следующий уровень меню, где выбирается режим работы твердомера: “калибровка”, “измерение” или “обработка”. Выбор режима осуществляется клавишами ← “влево” и “вправо” →.

Переход к выбранному рабочему режиму – клавишей ↓ “вниз”. Возврат на уровень выше производится нажатием клавиши ↑ “вверх”.

Подготовка к работе прибора происходит следующим образом:

1. Включение питания твердомера осуществляется длительным (более 2 с) нажатием клавиши ↓ “вниз”. При этом включается режим работы, в котором твердомер работал до отключения, и по всему полю дисплея появляются символы, соответствующие этому режиму. Выключение питания производится автоматически при отсутствии активности клавиатуры и датчика. Также прибор автоматически выключается при разряженном аккумуляторе.

2. Включение и выключение подсветки дисплея осуществляется нажатием клавиши ↑ “вверх” на уровне управления “Выбор шкалы”. Уровень управления “Выбор шкалы” достигается двойным нажатием клавиши ↑ “вверх” из любого рабочего режима. При этом на дисплее появляется мигающая надпись “шкала”. Порядок работы прибора следующий:

Выйдите на уровень управления “выбор шкалы”. Клавишей ← “влево” или → “вправо” выберите шкалу, на которой будут производиться измерения. Нажатием клавиши ↓ “вниз” войдите на уровень управления “выбор режима”. На дисплее появится мигающая надпись “измерение”. Двойным нажатием клавиши ↓ “вниз” зафиксируйте режим измерений. Символ датчика на дисплее начнет мигать, что означает приглашение к измерениям.

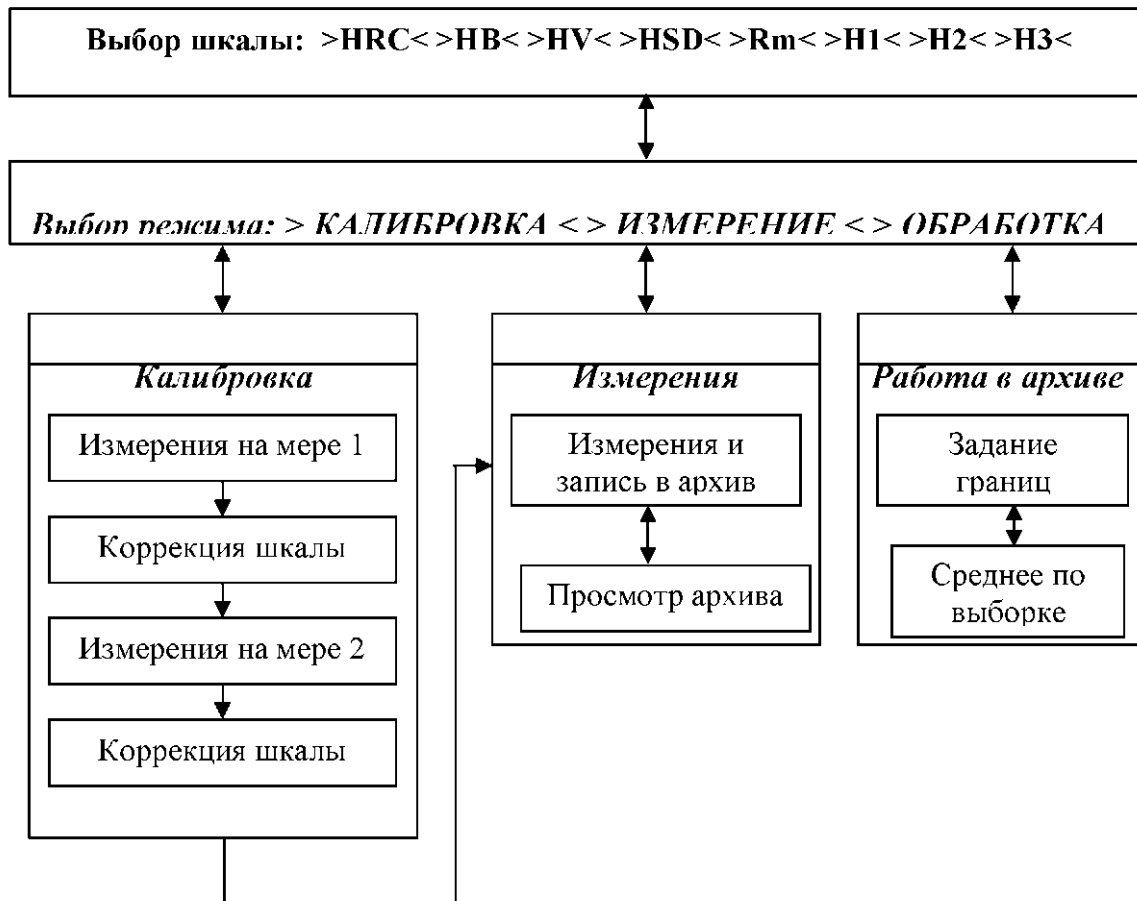


Рисунок 5.2 Схема работы твердомера МЕТ-Д1

Взведите пружину и установите датчик на деталь, твердость которой измеряется, и плавно нажмите на спусковую кнопку.

Одновременно с началом звукового сигнала в центральной части дисплея крупными цифрами отражается измеренное число твердости, слева – обозначение шкалы, под ним – текущий номер измерения. На темном поле внизу индицируется выбранный режим измерений и текущий номер ячейки архива, в который, при необходимости, можно записать измеренное значение твердости (рис. 5.3).

После звукового сигнала твердомер готов к новому измерению.



Рисунок 5.3 – Экран твердомера при выборе шкалы измерения

Следует обратить внимание на символ батарейки в правой части дисплея. Затемненная часть символа батарейки определяет степень заряженности автономного источника питания.

5.3 Режимы измерений твердомера МЕТ-Д1

Возможны следующие варианты работы с твердомером в режиме измерений: измерение без запоминания результатов; просмотр данных, содержащихся в архиве; измерения с записью каждого одиночного результата в архив; измерения с записью в архив усредненного значения по группе измерений.

а) Измерения без запоминания результатов.

Проведите измерения в соответствии с предыдущим пунктом. Измеренное значение будет индицироваться до следующего измерения. Данные предыдущего измерения при этом утрачиваются. Числа на дисплее, обозначающие текущий номер измерения и текущий номер ячейки архива могут быть произвольными. Действий с клавиатурой не требуется.

б) Просмотр архива.

Твердомер может хранить в своей энергонезависимой памяти (архиве) до 100 результатов как одиночных, так и предварительно усредненных по произвольному (также до 100) количеству измерений. Адрес, по которому записывается очередной результат, обозначается в виде числа от 01 до 99 в нижней строке дисплея может быть выбран оператором произвольно и впоследствии использоваться для вызова из архива на дисплей результатов измерений с целью просмотра или дальнейшей обработки.

Для просмотра данных, содержащихся в архиве, нажмите кнопку ↓ “вниз”. На нижней строке дисплея появится надпись “архив № XX”. Каждое нажатие на клавишу ← “влево” или → “вправо” изменяет адрес ячейки архива на единицу вниз или вверх соответственно (рис 5.4).

При этом на дисплее индицируется содержимое соответствующей ячейки.



Рисунок 5.4 – Экран твердомера в режиме “архива”

Для возвращения в режим измерения нажмите клавишу ↑ “вверх”.

в) Измерения с запоминанием результатов.

Установите номер ячейки архива, с которой предполагается начать работать. Для этого войдите в архив и клавишами ← “влево” или → ”вправо” установите в нижней строке нужное число. В дальнейшем ячейки будут заполняться в порядке возрастания номеров. Вернитесь в режим измерений.

Установите значение 00 на текущем счетчике измерений. При выполнении предыдущей операции это происходит автоматически. Если она не выполнялась, просто войдите в архив и выйдите из него.

Выполните одно или несколько измерений. Результат любого измерения может быть аннулирован. Для этого после ошибочного измерения нажмите клавишу ← “влево” и проведите измерение заново. Для записи результата в архив нажмите клавишу → “вправо”.

Если было проведено одно измерение, будет записан его результат, отраженный на дисплее, если несколько – среднее значение по всем проведенным измерениям, количество которых отражено на текущем счетчике. Предыдущая запись в ячейке при записи новых данных стирается. При этом автоматически изменится на единицу номер ячейки архива, т. е. следующий будет записан в следующую ячейку.

Перед проведением следующего измерения опять установите текущий счетчик на 00, в противном случае при следующей записи в архив в усреднении будут участвовать предыдущие результаты измерений.

Запись в архив может быть выполнена также клавишей ↓ “вниз”. В этом случае номер ячейки не изменяется, а прибор выходит в режим просмотра архива. Это удобно для замены содержимого одиночной ячейки архива.

г) Режим обработки данных.

Этот режим позволяет получать среднее значение содержащих в архиве данных по любому заданному интервалу ячеек архива.

С уровня управления “Выбор режима” (рис. 5.5) клавишами “влево” ← или → “вправо” выйдите в режим “обработка”, что индицируется соответствующей мигающей надписью, утвердите этот режим нажатием клавиши ↓ “вниз”. В нижней строке слева и справа появятся двухзначные числа, возле одного из них – значок “<” или “>”.



Рисунок 5.5 – Экран твердомера при “выборе режима”

При каждом нажатии клавиши ↓ “вниз” значок перемещается к другому числу. Каждое нажатие клавиш ← “влево” или → “вправо” соответственно уменьшает или увеличивает число со значком на единицу. Эти числа означают номера ячеек архива, в пределах которых усредняются данные.

Результат усреднения непрерывно индицируется на дисплее.

Например, если слева стоит число 01, а справа 07, это означает, что на дисплее представлен результат усреднения содержимого ячеек с первой по седьмую включительно.

Содержимое ячеек архива при описанных операциях не изменяется.

5.4 Калибровка твердомера МЕТ-Д1

Калибровку твердомера следует проводить после длительного хранения, а также при значительных изменениях условий эксплуатации (температуры и т. д.) и перестановке датчика с другого прибора.

Калибровка выбранной шкалы твердомера должна производиться на двух эталонных мерах 2-го разряда различной твердости, аттестованных в этой шкале. Срок годности мер твердости – 2 года со дня проверки.

При использовании шкалы R_m твердомер необходимо калибровать по шкале Бринелля.

Последовательность операций при калибровке следующая.

Включите питание твердомера и выйдите на уровень управления “выбор шкалы”. Из любого рабочего режима это достигается двойным нажатием на клавишу \uparrow “вверх”. При этом на дисплее появляется мигающая надпись “шкала”. Затем клавишей \leftarrow “влево” или \rightarrow “вправо” выберите шкалу, в которой будет проводиться калибровка. Нажатием клавиши \downarrow “вниз” войдите на уровень управления “выбор режима”.

С уровня управления “Выбор режима” клавишами \leftarrow “влево” или \rightarrow “вправо” выйдите в режим “калибровка”, что индицируется соответствующей мигающей надписью. Нажатием клавиши \downarrow “вниз” “зафиксируйте” режим калибровки.

Крупными цифрами в центральной части дисплея отражается измеренное число твердости, слева – обозначение шкалы, под ним номер измерения в пределах шага калибровки. На темном поле внизу индицируется номер шага калибровки, мигающий символ датчика слева – приглашение к работе с датчиком.

Процесс калибровки состоит из четырех шагов.

Цель первого шага – получение усредненного значения числа твердости одной из мер (произвольной).

Проведите измерение. Затем для усреднения результатов измерений по поверхности меры следует выполнить не менее пяти отпечатков.

Нажатием клавиши \downarrow “вниз” усредненное по проведенным измерениям значение числа твердости занесите в память прибора.

Цель шага № 2 калибровки – приведение в соответствие усредненного показания твердомера по результатам измерений меры и номинального значения твердости эталонной меры. Усредненный результат измерений с помощью клавиши \leftarrow “влево” (уменьшение) или \rightarrow “вправо” (увеличение) приведите в соответствие с номинальным значением твердости меры.

Нажмите клавишу \downarrow “вниз” (шаг № 3). Повторите все операции шага № 1 на второй мере твердости. Нажатием клавиши \downarrow “вниз” перейдите к шагу № 4. Аналогично шагу № 2 клавишами \leftarrow “влево” или \rightarrow “вправо” приведите в

соответствие показание твердомера с номинальным значением твердости второй меры. Калибровка окончена. Нажатием клавиши ↓ “вниз” выйдете в режим измерений.

Качественная калибровка твердомера требует от оператора определенных навыков. В случае любых сомнений в результатах следует повторить весь цикл калибровки.

К особенностям работы с датчиком твердомера можно отнести то, что получение надежных результатов измерений требует аккуратности и соблюдения определенных правил. Следует обратить внимание на перпендикулярность оси датчика к соответствующему участку детали и на неподвижность детали в процессе измерения.

Поверхность изделия, на которой проводят измерения, должна быть очищенной от загрязнений, окалины и ржавчины. Наличие последних приводит, как правило, к увеличению разброса результатов. К этому же приводят и повышенная шероховатость поверхности, которая не должна превышать значения $3,2R_a$.

Таблица 5.1 – Результаты измерений на приборе МЕТ-Д1

№	Материал	Твердость по Бринеллю	Твердость по Роквеллу	Твердость по Виккерсу	Среднее по выборке	Примечания

5.6 Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Основные положения.
3. Описание устройства и принципа работы прибора МЕТ-Д1.
4. Таблица с полученными результатами.
5. Краткие выводы.

Контрольные вопросы:

1. Какие элементы включает в себя твердомер МЕТ-Д1?
2. Расскажите о принципе работы прибора МЕТ-Д1.
3. Какие существуют режимы измерений у твердомера МЕТ-Д1?
4. Из скольких шагов состоит процесс калибровки?
5. Каким образом можно произвести запись измерения в архив МЕТ-Д1?

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Жуковец Н.И. Механические свойства металлов. – М.: Высшая школа, 1986. – 312 с.

4. Колмаков А.Г. Методы измерения твердости. – М.: Интернет Инжиниринг, 2000. – 412 с.

5. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Механические свойства материалов». Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И., Атамбаев Ж.Н., КарГТУ, 2005 г.

Контрольные задания для СРС [1, 2, 12]

1. Режимы измерений электронных приборов типа прибора МЕТ-Д1.
2. Принцип работы электронных приборов типа МЕТ-Д1.
3. Особенности измерения электронных приборов типа МЕТ-Д1.

Лабораторная работа № 6 Испытания на микротвердость

Порядок проведения испытаний на микротвердость:

1. Подобрать нагрузку и установить грузы на стержень 2. Величина нагрузки должна быть такой, чтобы диагональ отпечатка равнялась 30...50 делениям барабана 7 окуляр-микрометра.

2. Установить образец в пластине на специальную подставку и с помощью пресса добиться параллельности плоскостей шлифа, подставки и предметного столика.

3. Установить столик в крайнее правое положение и поместить на него подставку с образцом под объектив микроскопа, закрепить ее прижимными лапками.

4. Освободить тубус 8 микроскопа и с помощью винтов макро- 6 и микроподачи 5 нанести на фокус поверхность образца, а с помощью окулярной линзы 12 – перекрестии шкалы окуляр-микрометра.

5. Выбрать на образце подходящее место для нанесения отпечатка и с помощью микрометрических винтов подвести его под перекрытие нитей измерительного окуляра; провести окончательную наводку на резкость поверхности образца и перекрытий шкалы.

6. Перевести предметный столик в крайнее левое положение (на 180^0) до упора и закрепить его стопорным винтом, находящимся в нижней неподвижной части столика.

7. Повернуть рукоятку 3 на себя одним пальцем плавно без рывков в течение примерно 15 с до касания индентором 1 поверхности образца и произвести нагружение с выдержкой под нагрузкой около 4...7 секунд.

8. Снять нагрузку поворотом ручки 3 в обратном направлении, освободить предметный столик, перевести образец под объектив микроскопа и произвести измерение диагоналей отпечатка. Количество отпечатков может быть 100 и более.

Цель работы: ознакомиться с устройством твердомера ПМТ-3 для измерения микротвердости материалов, изучить особенности методики испытания на микротвердость, научиться обрабатывать результаты измерений.

6.1 Общие положения

Метод измерения микротвердости начал разрабатываться в Советском Союзе с начала 1940 г. Первый такой прибор был создан М.М. Хрущевым и Е.С. Берковичем, а одна из его разновидностей – твердомер ПМТ-3 широко применяется в научно-производственной практике и в настоящее время. Метод микротвердости предназначен для измерения твердости микроскопических объемов металлов и сплавов (зерен, границ фаз, дендритной ликвации, диффузионных слоев и т. д.), а также твердости мелких деталей приборов, фольги, проволоки, гальванических покрытий, поверхностных слоев металлов после химико-термической обработки и др.

Особенность метода определения микротвердости состоит в том, что с его помощью можно решать исследовательские задачи, связанные с развитием структурных и фазовых превращений, протеканием диффузионных процессов, изменением пределов растворимости фаз в зависимости от различных факторов, а также судить о степени искаженности кристаллических решеток при термической и термомеханической обработке, анизотропии свойств и развитии текстуры при градиентном отжиге и деформации.

Метод измерения микротвердости стандартизирован (ГОСТ 9450-76) и принципиально не отличается от метода определения твердости по Виккерсу: используется такой же индентор – алмазная четырехгранная пирамида с углом при вершине 136° , а также порядок операций, способ обработки результатов испытаний и способ нагружения – плавное вдавливание индентора в материал. Меняется лишь величина нагрузки – от 2 до 500 Гс (0,02...4,9 Н). Соответственно увеличивается локальность метода, она измеряется единицами микронов.

Число твердости обозначается буквой H с указанием в нижнем правом углу величины нагрузки в ГС и определяется по формуле:

$$H = 1854 \cdot \frac{P}{d^2}, \quad (25)$$

где P – нагрузка;

d – диагональ отпечатка, мкм;

$d^2/1854$ – площадь боковой поверхности пирамидального отпечатка. Для определения числа микротвердости по длине диагонали (мкм) при разных нагрузках существуют специальные таблицы. При записи величины микротвердости размерность обычно не указывается.

6.2 Устройство прибора ПМТ-3

Общий вид микротвердомера ПМТ-3 показан на рис. 6.1, а. На чугунном основании 1 установлены предметный столик 2 и стойка 3, на которой укреплен кронштейн с микроскопом и нагружается устройством 4. Микроскоп состоит из тубуса 8, окуляр-микрометра 7, сменного объектива 10 и осветителя 9 с набором светофильтров. Тубус 8 с помощью винтов макро – 6 и

микроподачи 5 может перемещаться в вертикальном направлении для обеспечения, соответственно, грубой и тонкой наводки микроскопа на резкость.

Предметный столик 11 состоит из двух частей: неподвижной нижней и подвижной верхней, которая с помощью микрометрических винтов может перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а с помощью рукоятки 2 – вращаться вокруг оси на 180° для перемещения образца под индентор или объектив.

Нагружающее устройство (рис. 6.1, б) представляет собой стержень, оканчивающийся штоком 2, к нижней части которого крепится оправка с алмазным индентором 1. Стержень подвешен к кронштейну на двух плоских пружинах 4 и 6 и связан с рукояткой 3, обеспечивающий ему движение вниз при нагружении и вверх при разгрузке. Грузами служат диски с прорезью весом от 2 до 500 Гс, которые перед испытанием надеваются на стержень 2. Процесс нагружения осуществляется рукояткой 3 при движении ее вперед до касания индентором поверхности образца.

Для правильной оценки микротвердости прибор должен быть тщательно юстирован, центрирован, градуирован. Задача юстировки состоит в точном совмещении оптической оси с осью нагружения при повороте предметного столика на 180° . Задача центровки заключается в том, чтобы отпечаток индентора находился точно в месте пересечения нитей окуляр-микрометра (рис. 6.1). Задача градуировки (или юстировки в вертикальном направлении) сводится к правильной установке по высоте механизма нагружения для получения заданного размера диагонали отпечатка у определенного материала при известной нагрузке. Обычно для этой цели используется отоженный алюминий при нагрузке 2 Гс, диагональ отпечатка при этом равна 32 делениям по измерительному микрометру.

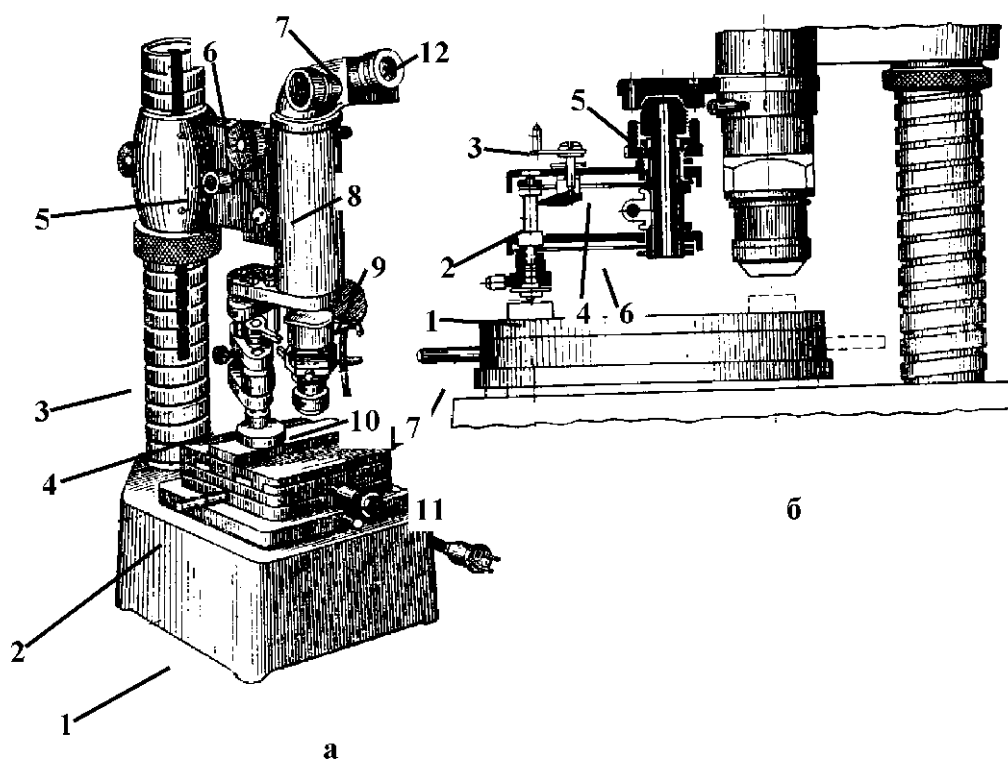


Рисунок 6.1 Устройство микротвердомера ПМТ-3

6.3 Подготовка образцов

1. Фольгу и ленты испытывают без предварительной подготовки.
2. Поверхность массивных образцов шлифуют и полируют до полного исчезновения царапин и рисок. Для определения твердости отдельных фаз образец подвергается металлографическому травлению.

6.4 Устройство и принцип работы окуляр-микрометра

Окуляр-микрометр представляет собой микрометр 7, показания которого связаны со шкалой и перекрестием нитей, фиксируемым двойной линией, расположенной на шкале измерительной линзы 12 (рис. 6.2). До начала измерений двойная линия, а, соответственно, и перекрестие должны быть расположены на цифре 4.

Порядок измерения длины диагонали отпечатка состоит в следующем:

1. Подвести с помощью микрометрических винтов правый угол отпечатка под перекрестие, при этом шкала барабана или лимб микрометра должна находиться в нулевом положении.

2. Вращением барабана микрометра 7 перевести перекрестие от правого к левому углу отпечатка и измерить горизонтальную диагональ ромба.

3. Произвести отсчет показаний шкалы и лимба измерительного барабана микрометра и записать полученный результат в протокол испытаний. Полный оборот барабана микрометра соответствует перемещению перекрестия (двойного штриха) на одно деление шкалы. Произвести то же самое в обратном направлении, показания записать (2 измерения).

Развернуть шкалу окуляра на 90° , так чтобы она заняла вертикальное положение.

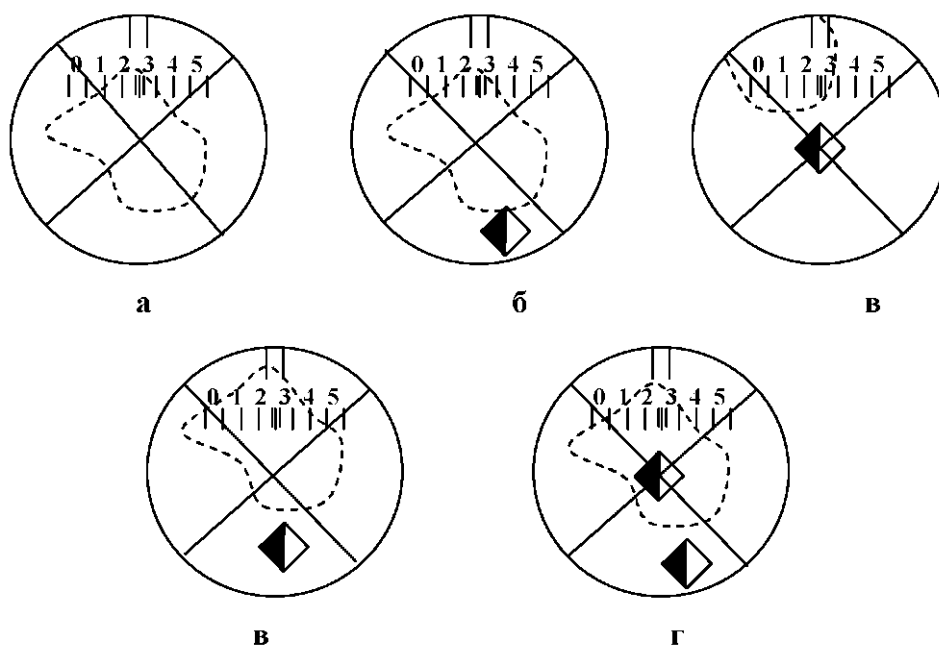


Рисунок 6.2 Схема центровки и измерение отпечатка на приборе ПМТ-3

4. Подвести с помощью микрометрических винтов верхний угол отпечатка под перекрестие и вращением барабана микрометра перевести его в нижний угол отпечатка, произведя измерение вертикальной диагонали, результат записать. Операцию повторить в обратном направлении.

5. Найти среднее арифметическое 4 измерений ($d_B^1, d_B^2, d_r^1, d_r^2$), результат записать в протокол испытаний

$$\bar{d} = \frac{d_B^1 + d_B^2 + d_r^1 + d_r^2}{4}. \quad (26)$$

6. Определить длину диагонали отпечатка в мкм, умножив ее на значение в делениях на 0,3 мкм – цену одного деления лимба барабана окулярного микрометра. Рассчитать H по формуле (25), результат записать в протокол испытаний. Число твердости можно определить по специальным таблицам, рассчитанным для разных нагрузок.

Результат испытаний записать в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты измерения микротвердости образцов

№	Материал	d_B дел.	d_r дел.	\bar{d} дел.	\bar{d} мкм	$P, Гс$	H по табл.	H по (25)	Примечание

6.5 Другие методы определения твердости

6.5.1 Твердость при царапании

Определение твердости этим методом производят царапанием поверхности алмазным конусом с углом при вершине 90° . Мерой твердости в этом случае является величина, обратная ширине царапины при определенной постоянной нагрузке. На каждом образце измеряют ширину большого числа царапин, так как точное измерение ширины царапины затруднено вследствие нерезких ее краев.

Твердость при царапании характеризует уже не сопротивление пластической деформации, как в предыдущих методах, а сопротивление разрушению, так как при царапании происходит местное разрушение.

Н.Н. Давиденков установил, что твердость при царапании, вычисленная как величина, обратная ширине царапины при нагрузке на алмаз 50 г, тесно связана с сопротивлением разрушению при разрыве. У большинства металлов при царапании происходит разрушение путем среза. Поэтому метод царапания, широко распространенный при изучении минералов, может представлять большой практический интерес и при изучении металлов, давая возможность определять сопротивлением разрушению и связанных с ним характеристик, по данным испытаний очень малого участка поверхности.

6.5.2 Упругий отскок шарика

При этом способе критерием твердости служит высота h упругого отскока бойка весом q , падающего на плиту с определенной высоты H . Если работа удара бойка

$$W_0 = Hq, \quad (27)$$

а работа отскока бойка

$$W_1 = hq_1, \quad (28)$$

то разность

$$W = W_0 - W_1 = q(H - h) \quad (29)$$

является мерой твердости.

Чем больше W , тем меньше твердость. Испытания производятся на специальных переносных приборах (склероскопах). Шкала твердости в этих приборах принята условно так, что высота отскока бойка от поверхности твердой инструментальной стали принята за 100 равных делений. Образцы для испытания должны быть либо массивными – весом порядка 2 кгс и выше, либо жестко зажаты в опору во избежание значительных ошибок.

Принцип данного метода состоит в том, что измеряется поглощенная при отскоке работа W . У идеального твердого тела вся работа возвращается бойку, т. е. $H=h$ и $W=0$, и твердость максимальна. Чем ниже сопротивление пластической деформации, тем больше поглощенная материалом работа деформации, тем больше разность $H-h$, тем меньше твердость.

Поскольку величина работы зависит от модуля упругости, материал с меньшим модулем может казаться значительно более твердым вследствие большой величины работы упругой деформации и относительно меньшей величины работы пластической деформации.

Например, при испытании по Шору, резина и стекло оказываются более твердым, чем закаленная сталь.

При этом данный метод принципиально неприменим для сравнения между собой материалов с резко различными модулями упругости.

Метод упругого отскока широко применяется для контроля отливок, поковок, при изучении материала в различных состояниях и т. д.

Между величинами твердости, определяемой при упругом отскоке, и при статическом вдавливании шарика наблюдается почти линейная зависимость. В диапазоне значений твердости до HB 400...500. Метод отличается высокой производительностью (несколько сот измерений в час).

6.5.3 Ударное вдавливание шарика

Твердость измеряется на приборе, в котором баба весом 1,5 кг с укрепленным на ее нижней части стальным шариком определенного диаметра D свободно падает с высоты 200 мм на горизонтальную поверхность образца, плотно зажатого в особую наковальню. Измерив диаметр отпечатка d , подсчитывают вытесненный объем металла (шарового сегмента, который характеризует деформированный объем).

За динамическую твердость при вдавливании принимается удельная работа вдавливания шарика, определяемая как частное от деления ударной высоты вдавливания ($\text{кгм} \times \text{мм}$) на объем отпечатка (мм^3).

Динамическая твердость, определяемая данным методом, обычно больше статической. Отношение ударной твердости к НВ для отожженных сталей близко к 1,7 и растет с увеличением твердости материала.

Основное применение метода – определение твердости при повышенных температурах, чему способствует простота метода и кратковременность соприкосновения шарика с нагретым образцом.

6.6 Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Основные положения.
3. Отличие метода микротвердости от методов твердости.
4. Способы определения микротвердости.
5. Таблицы с результатами испытаний.
6. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Что такое микротвердость?
2. Каковы возможности испытания на микротвердость?
3. Как производится измерение диагоналей отпечатка?
4. Как работает микротвердомер ПМТ-3?
5. Из каких основных частей состоит прибор ПМТ-3?
6. Кто впервые предложил этот метод и разработал прибор ПМТ?
7. От каких факторов зависит выбор нагрузки?

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Жуковец Н.И. Механические свойства металлов. – М.: Высшая школа, 1986. – 312 с.
4. Колмаков А.Г. Методы измерения твердости. – М.: Интермет Инжиниринг, 2000. – 412 с.
5. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Механические свойства материалов». Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И., Атамбаев Ж.Н., КарГТУ, 2005 г.

Контрольные задания для СРС [1, 2, 6, 12]

1. Методика проведения испытаний на микротвердость.
2. Универсальный твердомер марки УПТ-1.
3. Юстировка.
4. Образцы для измерения микротвердости.

Лабораторная работа № 7 Определение прочности древесины при сжатии вдоль волокон

Порядок выполнения работы:

1. Измерить размеры поперечного сечения образцов на середине их длины с погрешностью не более 0,1 мм.

2. Образец установить на комплексе КСИМ-40 в специальное приспособление таким образом, чтобы усилие было направлено вдоль продольной оси образца. Приспособление в гнезде основания корпуса имеет съемную шаровую опору, обеспечивающую равномерное приложение усилий по всей торцовой поверхности образца.

3. Приспособление с образцом установить между головками машины. Стрелка силоизмерителя должна быть на нулевом делении шкалы. Вращая левую рукоятку машины, поднять нижнюю головку, то есть нагрузить образец. Нагружение проводят равномерно со средней скоростью (25000 ± 5000) Н/мин. При испытании с механическим приводом скорость нагружения равна 4 мм/мин. Испытание довести до разрушения образца, то есть до момента движения стрелки силоизмерителя в обратную сторону.

4. После испытания опустить нижнюю головку машины, вынуть приспособление с образцом. Зафиксировать показания стрелки на шкале силоизмерителя в момент разрушения образца. Рабочую и контрольную стрелку поставить в нулевое положение.

5. Аналогичным образом испытать остальные образцы древесины в другом влажном состоянии. Записать максимальную нагрузку для каждого из них.

6. Осмотреть образцы после разрушения. Поместить каждый образец в отдельную бюксу и взвесить. Затем образцы в бюксах высушить в сушильном шкафу до абсолютно сухого состояния (как было описано выше); взвесить снова. Записать массу образцов в момент испытания и в абсолютно сухом состоянии.

7. Вычислить влажность образцов в момент испытания.

8. Вычислить предел прочности древесины при сжатии вдоль волокон с погрешностью не более 0,5 МПа по формуле:

$$\sigma_{\text{II}} = \frac{P_{\text{max}}}{ab}, \quad (30)$$

где σ_W – предел прочности древесины при влажности W , МПа;

P_{max} – максимальная нагрузка, МН;

a, b – размеры поперечного сечения образца, м.

Сравнить величину предела прочности образцов с различной влажностью. Объяснить разницу в значениях этих величин.

9. Пересчитать предел прочности на нормализованную влажность по формуле:

$$\sigma_{12} = \sigma_W [1 + \alpha \cdot (W - 12)], \quad (31)$$

где σ_{12} – показатель прочности при влажности 12 %;

σ_W – показатель прочности при влажности W ;

W – влажность древесины в момент испытания;

α – поправочный коэффициент на влажность, для всех пород деревьев равен 0,04.

9. Результаты наблюдений и вычислений занести в таблицу 7.1.

Цель работы: изучить метод испытания древесины на сжатие вдоль волокон по ГОСТ 16483.10–84 и определить показатели прочности.

7.1 Приборы, оборудование, инструменты, расходный материал

Испытательная машина; приспособление в машине для данного вида испытания; штангенциркуль или микрометр; образцы древесины; весы; сушильный шкаф; бюксы; журнал наблюдений.

7.2 Подготовка к работе

Заготовить образцы древесины различной влажности ($W=8...10$ %; $W=15...20$ % и $W \geq W_{nr}$). В соответствии с требованиями ГОСТа образцы изготовить в форме прямоугольной призмы основанием 20×20 мм и длиной вдоль волокон 30 мм. Пронумеровать образцы.

7.3 Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Сведения о приборах, оборудовании и инструментах, используемых в работе.
3. Порядок проведения работы.
4. Таблица проведенных испытаний.
5. Выводы.

Таблица 7.1 Результаты определения прочности на сжатие образцов из древесины

№№	Размеры поперечного сечения образца, мм	Площадь поперечного	Максимальная нагрузка, P_{max} , Н	Влажность образца	Предел прочности древесины при сжатии вдоль волокон, МПа
----	---	---------------------	--------------------------------------	-------------------	--

	ширина a	толщина b				σ_w	σ_{12}

Контрольные вопросы:

1. Расскажите о порядке определения прочности образцов из древесины.
2. По какой формуле определяется предел прочности древесины при сжатии вдоль волокон?

Рекомендуемая литература:

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Жуковец Н.И. Механические свойства металлов. – М.: Высшая школа, 1986. – 312 с.
4. Ржевская С.В. Материаловедение.– М.: МГТУ, 2000.– 280 с.
5. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Механические свойства материалов». Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И., Атамбаев Ж.Н., КарГТУ, 2005 г.
6. Станко Я.Н. Лабораторные работы по материаловедению. М.: Высш. шк., 1989.

Контрольные задания для СРС [1, 2, 9, 12]

1. Механические свойства древесины.
2. Методы определения механических свойств древесины.
3. Оборудование для проведения прочностных свойств древесины.

5 Тематический план самостоятельной работы студента с преподавателем

Наименование темы СРС	Цель занятия	Форма проведения	Содержание задания	Рекомендуемая литература
Тема 1. Напряжения и деформации.	Обретение практических навыков определения истинных напряжений	Вычисление по формулам	Определение истинных и условных напряжений материалов	[1, 2]
Тема 2. Классификация механических испытаний.	Обретение практических навыков обработки результатов механических испытаний	Расчет	Статистическая обработка ряда экспериментально полученных результатов механических испытаний	[1, 2, 3]
Тема 3. Упругие свойства.	Углубление знаний по	Графическая работа с	Графическое определение	[1, 2]

	данной теме	первичной диаграммой растяжения	предела пропорциональности на первичной диаграмме растяжения	
Тема 4. Пластическая деформация.	Углубление знаний по данной теме	Расчет	Практическое определение коэффициента мягкости при различных схемах нагружения	[1, 12]
Тема 5. Деформационное упрочнение материалов.	Углубление знаний по данной теме	Расчет	Количественная оценка различных причин влияющих на структуру и свойства деформированного металла	[1, 12]
Тема 6. Механические свойства, определяемые при статических испытаниях (растяжении).	Углубление знаний по данной теме	Графическая работа с первичной диаграммой растяжения	Графическое определение условного предела текучести	[1, 2]
Тема 7. Механические свойства, определяемые при статических испытаниях (изгибе).	Углубление знаний по данной теме	Расчет	Определение условного нормального напряжения для образцов различного сечения	[1, 2]
Тема 8. Механические свойства, определяемые при динамических испытаниях.	Углубление знаний по данной теме	Расчет	Определение величины ударной вязкости	[1, 2]
Тема 9. Механические свойства, определяемые при циклических испытаниях.	Углубление знаний по данной теме	Расчет	Определение параметров цикла напряжений по конкретным кривым	[1, 2]
Тема 10. Влияние температуры на прочность и пластичность материалов.	Углубление знаний по данной теме	Расчет	Расчет релаксации напряжений	[1, 2]
Тема 11. Разрушение материалов.	Углубление знаний по данной теме	Расчет	Вычисление критерия Гриффитса	[1, 12]
Тема 12. Новый подход к оценке механических свойств.	Углубление знаний по данной теме	Расчет	Определение напряженно-деформированного состояния тела методом конечных элементов	[12]

6 Материалы для контроля знаний студентов в период рубежного контроля и итоговой аттестации

6.1 Тематика письменных работ по дисциплине

Тематика рефератов

1. Деформация.
2. Напряжения.
3. Статические испытания.
4. Динамические испытания.
5. Циклические испытания.
6. Константы упругих свойств материалов.
7. Методы определения упругих свойств.
8. Неполная упругость металлов.
9. Внутреннее трение металлов.
10. Пластическая деформация материалов.
11. Деформационное упрочнение.
12. Хрупкое разрушение.
13. Вязкое разрушение.
14. Схемы образования трещин в материалах.
15. Теория хрупкого разрушения Гриффитса.
16. Испытания на растяжение.
17. Испытания на сжатие.
18. Испытания на кручение.
19. Испытания на изгиб.
20. Испытания на динамическую вязкость.
21. Твердость и методы ее определения.
22. Жаропрочность и методы ее определения.
23. Ползучесть и методы ее определения.
24. Усталость и выносливость материалов.
25. Синергетика.
26. Фракталы.
27. Методы определения механических свойств древесины.
28. Методы определения механических свойств пластмасс.
29. Методы определения механических свойств резины.
30. Методы определения механических свойств композиционных материалов.

6.2 Вопросы для самоконтроля

1. Какова современная трактовка физического и технического смысла важнейших механических свойств?
2. Что такое напряжения, тензор напряжений?
3. Что такое деформация, тензор деформации?

4. Какие есть схемы напряженного и деформированного состояния при механических испытаниях по Я.Б.Фридману?
5. Что такое коэффициенты мягкости и трехосности?
6. Назовите классификацию механических испытаний по способу нагружения и характеру изменения нагрузки во времени.
7. Как проходят испытания на твердость?
8. Как проходят испытания на ползучесть и длительную прочность?
9. Как производится статистическая обработка механических испытаний?
10. Что такое упругие свойства и неполная упругость металлов?
11. Как формулируется закон Гука и что такое константа упругих свойств?
12. Что такое модуль Юнга, модуль сдвига и коэффициент Пуассона?
13. Что представляет собой механизм упругого последействия в свете теории точечных дефектов?
14. Что такое релаксационное, гистерезисное и резонансное внутреннее трение?
15. Пластическая деформация металлов двойникованием.
16. Что такое кристаллографические плоскости и направления преимущественного двойникования?
17. Каково влияние различных факторов на пластическую деформацию металлов и их деформированное упрочнение?
18. Что такое энергия дефектов упаковки, схемы напряжённого состояния, температуры и скорости?
19. Что собой представляют образцы и конструкция машины для испытаний на растяжение? Методика проведения испытаний.
20. Что такое прочностные характеристики при растяжении: предел упругости, предел текучести, предел прочности?
21. Что такое характеристики пластичности: относительное сужение, относительное удлинение?
22. Что собой представляют схемы и формы образцов для испытаний на сжатие?
23. Что собой представляют условные пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочности?
24. Что собой представляют схемы разрушения при сжатии: срез и отрыв?
25. Как проводятся испытания на изгиб? Диаграмма изгиба.
26. Как определяются номинальные предел текучести, предел прочности?
27. Что собой представляет технологическая проба на изгиб?
28. Как проводятся испытания на кручение? Диаграмма кручения.
29. Как определяются условные пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочности?
30. Какова основная характеристика пластичности при кручении?
31. Что такое твердость? Понятие и определение твердости.
32. Каковы способы определения твердости? Твердость по Бринеллю. Методика определения твердости.
33. Твердость по Виккерсу. Методика определения твердости.

34. Твердость по Роквеллу. Методика определения твердости. Микротвердость.
35. Какова методика определения микротвердости?
36. Что такое жаропрочность? Понятие и определение жаропрочности.
37. Назовите основные методы определения характеристик жаропрочности.
38. Что такое логарифмическая ползучесть?
39. Что такое неустановившаяся высокотемпературная ползучесть.
40. Какова модель “истощения дислокаций”?
41. Какова модель диффузионной ползучести?
42. Каковы образцы и методика испытаний на ползучесть?
44. Что собой представляет третья стадия ползучести и разрушение механизмы зарождения трещин?
45. Как производятся испытания на длительную прочность?
46. Каково влияние легирования структуры на характеристики жаропрочности?
47. Каковы свойства материалов при динамических испытаниях?
48. Назовите особенности пластической деформации и разрушения при динамическом нагружении.
49. Как производятся динамические испытания на изгиб? Задача ударных испытаний.
50. Каковы размеры и форма образцов с надрезом для испытания на ударный изгиб.
51. Что такое ударная вязкость?
52. Назовите зависимость вязкости разрушения от скорости деформации.
53. Каковы механизмы зарождения трещин? Схемы зарождения трещин и дислокационных скоплений по Стро, А.Н. Орлову.
54. Приведите схемы возникновения трещины при встрече развивающихся двойников и торможение одного двойника другим.
55. Назовите схемы образования трещин в стыке зерен.
56. Каково развитие трещины с позиции механики разрушения?
57. Теория хрупкого разрушения Гриффитса.
58. Что такое вязкое разрушение.
59. Каковы формы излома и схема формирования чашечного излома?
60. Синергетический анализ процессов деформации и разрушения
61. Что такое усталость? Анализ диаграммы усталости.
62. Назовите факторы, влияющие на усталостную прочность.
63. Какова методика проведения усталостных испытаний?
64. Что такое усталость и изнашивание?
65. Назовите основные понятия об усталости и выносливости.
66. Какова методика проведения усталостных испытаний?
67. Как осуществляется определение усталостной долговечности?
68. Построение вероятностных диаграмм усталости.
69. Как проходят испытания на циклическую трещиностойкость?
70. Построение диаграммы усталостного разрушения.

71. Какова природа усталостного разрушения?
72. Назовите критерии подобия локального разрушения.
73. Какое оказывает влияние наполнитель на прочностные характеристики термореактивных пластмасс?
74. Назовите влияние степени кристалличности и пластификатора на механические свойства пластмасс?
75. Как определяются механические свойства резины?
76. Как определяется прочность древесины при сжатии вдоль волокон, при изгибе, при скалывании вдоль волокон?
77. Как осуществляется определение статической твердости древесины?

6.3 Экзаменационные билеты

1. Изменение взаимного расположения частиц тела, вызывающее изменение его размеров и формы называется:
- A) деформация.
 - B) упругость.
 - C) твёрдость.
 - D) жёсткость.
 - E) прочность.
2. Свойство тел деформироваться под нагрузкой и затем, после устранения сил восстанавливать своё первоначальное состояние называется:
- A) деформация.
 - B) упругость.
 - C) твёрдость.
 - D) жёсткость.
 - E) прочность.
3. Способность материала противостоять нагрузке не разрушаясь называется:
- A) деформация.
 - B) упругость.
 - C) твёрдость.
 - D) жёсткость.
 - E) прочность.
4. Способность материала противостоять внедрению в него другого материала называется:
- A) деформация.
 - B) упругость.
 - C) твёрдость.
 - D) жёсткость.
 - E) прочность.
5. Способность материала не гнуться под действием приложенной нагрузки называется:

- A) деформация.
- B) упругость.
- C) твёрдость.
- D) жёсткость.
- E) прочность.

6. Свойство материалов необратимо поглощать энергию при их пластическом деформировании – это:

- A) деформация.
- B) упругость.
- C) твёрдость.
- D) жёсткость.
- E) вязкость.

7. Способность твердых тел разрушаться при механических воздействиях без заметной пластической деформации – это:

- A) хрупкость.
- B) упругость.
- C) твёрдость.
- D) жёсткость.
- E) прочность.

8. Нормальные напряжения делят на:

- A) пластические и упругие.
- B) растягивающие и сжимающие.
- C) перпендикулярные и касательные.
- D) сдвигающие и остаточные.
- E) начальные и конечные.

9. Площадки, на которых действуют только нормальные напряжения, а касательные напряжения равны нулю, называются:

- A) тензором.
- B) нормальными.
- C) нулевыми.
- D) главными.
- E) пластическими.

10. Максимальные касательные напряжения действуют на площадках, расположенных к главным осям под углом:

- A) 0° .
- B) 30° .
- C) 45° .
- D) 60° .
- E) 90° .

11. Относительное удлинение определяют по формуле:

A) $\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%$.

B) $\delta = \frac{\Delta l}{l_k} \cdot 100\%$.

C) $\delta = \ln \frac{l_k}{l_0}$.

D) $\delta = S_{\max} - S_{\min} / 2$.

E) $\delta = \begin{pmatrix} S_x & t_{xy} & t_{xz} \\ t_{yx} & S_y & t_{yz} \\ t_{zx} & t_{zy} & S_z \end{pmatrix}$

12. Сдвиговые деформации вызваны:

- A) касательными напряжениями.
- B) нормальными напряжениями.
- C) относительным удлинением.
- D) тензором деформаций.
- E) упругостью материала.

13. Коэффициент мягкости схемы определяется по формуле:

A) $\alpha = \ln(1 + \delta)$.

B) $\alpha = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%$.

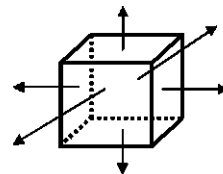
C) $\alpha = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%$.

D) $\alpha = \frac{t_{\max}}{S_{\max}^n}$.

E) $\alpha = \ln \frac{l_k}{l_0}$.

14. Схема какого напряженного состояния изображена на рисунке?

- A) одноосное растяжение.
- B) разноименное плоское напряженное состояние.
- C) двухосное растяжение.
- D) трехосное растяжение.
- E) разноименное объемное напряженное состояние.

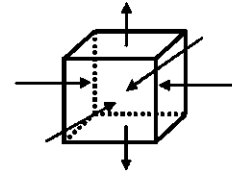


15. Схема какого напряженного состояния изображена на рисунке?

- A) одноосное растяжение.
- B) разноименное плоское напряженное состояние.
- C) двухосное растяжение.
- D) трехосное растяжение.
- E) разноименное объемное напряженное состояние.

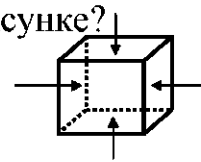
16. Схема какого напряженного состояния изображена на рисунке?

- A) одноосное сжатие.
- B) разноименное плоское напряженное состояние.
- C) двухосное сжатие.
- D) трехосное сжатие.
- E) разноименное объемное напряженное состояние.



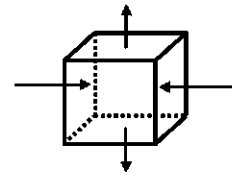
17. Схема какого напряженного состояния изображена на рисунке?

- A) одноосное сжатие.
- B) разноименное плоское напряженное состояние.
- C) двухосное сжатие.
- D) трехосное сжатие.
- E) разноименное объемное напряженное состояние.



18. Схема какого напряженного состояния изображена на рисунке?

- A) одноосное сжатие.
- B) разноименное плоское напряженное состояние.
- C) двухосное растяжение.
- D) трехосное сжатие.
- E) разноименное объемное напряженное состояние.



19. По формуле $S = \frac{P}{F}$ определяют:

- A) напряжение.
- B) прочность.
- C) деформацию.
- D) твердость.
- E) коэффициент мягкости.

20. Какой вид принимает тензор напряжений, когда главные направления напряжений обычно заранее известны и их можно выбрать в качестве координатных осей?

A) $S = \begin{pmatrix} S_x & t_{xy} & t_{xz} \\ t_{yx} & S_y & t_{yz} \\ t_{zx} & t_{zy} & S_z \end{pmatrix}$.

B) $S = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_1 \end{pmatrix}$.

C) $S = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$.

$$D) S = \begin{pmatrix} S_3 & t_2 & t_1 \\ t_3 & S_2 & t_1 \\ t_3 & t_2 & S_1 \end{pmatrix}.$$

$$E) S = \begin{pmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{pmatrix}.$$

21. Какому напряженному состоянию соответствует кольцевое сжатие образцов по боковой поверхности ($S_3 = S_2$)?

- A) двухосное растяжение.
- B) двухосное сжатие.
- C) разноимённое плоское напряжённое состояние.
- D) трёхосное растяжение.
- E) трёхосное сжатие.

22. Какому напряженному состоянию соответствует кручение цилиндрического стержня ($S_1 = -S_3$)?

- A) двухосное растяжение.
- B) двухосное сжатие.
- C) разноимённое плоское напряжённое состояние.
- D) трёхосное растяжение.
- E) трёхосное сжатие.

23. Какому напряженному состоянию соответствует гидростатическое растяжение в центре нагреваемого шара ($S_3 = S_2 = S_1$)?

- A) двухосное растяжение.
- B) двухосное сжатие.
- C) разноимённое плоское напряжённое состояние.
- D) трёхосное растяжение.
- E) трёхосное сжатие.

24. Какому напряженному состоянию соответствует испытание на растяжение образцов без надреза?

- A) одноосное растяжение.
- B) двухосное сжатие.
- C) разноимённое плоское напряжённое состояние.
- D) трёхосное растяжение.
- E) трёхосное сжатие.

25. Какому напряженному состоянию соответствует испытание на сжатие?

- A) двухосное растяжение.
- B) одноосное сжатие.
- C) разноимённое плоское напряжённое состояние.
- D) трёхосное растяжение.

Е) трёхосное сжатие.

26. Как называются испытания, характеризующиеся приложением к образцу нагрузок с резким изменением их величины и большой скоростью деформации?

- А) статическими.
- В) динамическими.
- С) циклическими.
- Д) на твёрдость.
- Е) на длительную прочность.

27. Для каких испытаний характерно многократное приложение к образцу изменяющихся нагрузок?

- А) статических.
- В) динамических.
- С) циклических.
- Д) на твёрдость.
- Е) на длительную прочность.

28. Для каких испытаний характерно плавное, относительно медленное изменение нагрузки и малая скорость деформации?

- А) статических.
- В) динамических.
- С) циклических.
- Д) на твёрдость.
- Е) на длительную прочность.

29. Примером циклического приложения нагрузок являются испытания:

- А) на длительную прочность.
- В) на твёрдость.
- С) на усталость.
- Д) на жёсткость.
- Е) на ползучесть.

30. Испытания на ползучесть и длительную прочность обычно проводят при повышенных температурах для оценки характеристик:

- А) коэффициента мягкости.
- В) твёрдости.
- С) усталости.
- Д) жаростойкости.
- Е) жаропрочности.

31. Если в сходных сечениях рабочей части образцов возникают тождественное напряжённое состояние и одинаковая относительная деформация, значит, соблюдаются условия:

- А) механического подобия.

- В) химического подобия.
- С) физического подобия.
- Д) геометрического подобия.
- Е) аналитического подобия.

32. Закон Гука определяет прямую пропорциональность между упругой деформацией и:

- А) пластической деформацией.
- В) скоростью приложения нагрузки.
- С) коэффициентом Пуассона.
- Д) напряжением.
- Е) внутренним трением.

33. Что определяют модули упругости?

- А) мягкость материала.
- В) твёрдость материала.
- С) жёсткость материала.
- Д) пластичность материала.
- Е) прочность материала.

34. Физический смысл модулей упругости состоит в том, что они характеризуют:

- А) отношение продольной относительной деформации к поперечной.
- В) относительное удлинение в упругой области.
- С) сопротивляемость металлов смещению атомов из положений равновесия в решётке.
- Д) скорость уменьшения напряжения по мере упругой деформации.
- Е) обратную пропорциональность между напряжением и упругой деформацией.

35. Коэффициент Пуассона находят по результатам:

- А) испытаний на растяжение.
- В) испытаний на кручение.
- С) рентгеноструктурного анализа.
- Д) импульсных методов.
- Е) резонансных методов.

36. А) коэффициента Пуассона.

- В) коэффициента мягкости.
- С) модуля сдвига.
- Д) модуля Юнга.
- Е) модуля объёмной упругости.

37. При повторном нагружении пластически слабodeформированного образца в обратном направлении его сопротивление малым пластическим деформациям снижается. В этом заключается:

- А) сущность работы крутильного маятника.
- В) явление упругой деформации.
- С) эффект Баушингера.
- Д) определение коэффициента Пуассона образца.
- Е) физический смысл модулей упругости.

38. Особенно большое практическое значение эффект Баушингера имеет при эксплуатации и испытаниях в условиях:

- А) статического нагружения.
- В) динамического нагружения.
- С) циклического нагружения.
- Д) длительной прочности.
- Е) ползучести.

39. Неупругие эффекты служат причинами:

- А) внутреннего трения.
- В) износа.
- С) повышения твердости.
- Д) снижения пластичности.
- Е) внутренних напряжений.

40. Пластическая деформация осуществляется скольжением и:

- А) смещением.
- В) сдвигом.
- С) торможением.
- Д) двойникованием.
- Е) перемещением.

\$\$\$ 41

В большинстве случаев металлы и сплавы деформируются путем:

- А) смещения.
- В) сдвига.
- С) торможения.
- Д) двойникования.
- Е) скольжения.

42. Мерой искажения кристаллической решетки, обусловленной присутствием дислокации служит:

- А) коэффициента Пуассона.
- В) коэффициента мягкости.
- С) модуля сдвига.
- Д) модуля Юнга.
- Е) вектор Бюргерса.

43. Линии скольжения - это ступеньки, образующиеся на поверхности в

результате выхода:

- A) границ зерен.
- B) дислокаций.
- C) точечных дефектов.
- D) дислоцированных атомов.
- E) дефектов упаковки.

44. Когда скольжение затруднено деформация осуществляется:

- A) смещением.
- B) сдвигом.
- C) торможением.
- D) двойникованием.
- E) перемещением.

45. Деформационное упрочнение обусловлено:

- A) смещением дислокаций.
- B) сдвигом дефектов упаковки.
- C) торможением дислокаций.
- D) наличием точечных дефектов.
- E) перемещением границ зерен

46. В большинстве случаев металлические материалы в конструкциях работают:

- A) под статическими нагрузками.
- B) под динамическими нагрузками.
- C) под циклическими нагрузками.
- D) при повышенных температурах.
- E) в агрессивных средах.

47. Наиболее распространённый вид испытаний для оценки механических свойств:

- A) испытания на усталостную прочность.
- B) испытания на ползучесть.
- C) испытания на кручение.
- D) испытания на одноосное растяжение.
- E) испытания на изгиб.

48. На практике механические свойства определяют по первичным кривым растяжения в координатах:

- A) напряжение – деформация.
- B) нормальные напряжения – касательные напряжения.
- C) нагрузка – абсолютное удлинение.
- D) ударная вязкость – радиус надреза.
- E) угол загиба – полная работа.

49. Предел пропорциональности $\sigma_{0,2}$ это напряжение:

- A) которое материал образца выдерживает без отклонения от закона Гука.
- B) при котором образец деформируется под действием практически неизменной растягивающей нагрузки.
- C) после снятия которого не наблюдается остаточных деформаций материала.
- D) характеризующее сопротивление максимальной равномерной деформации.
- E) при котором происходит разрыв образца.

50. Предел прочности – это напряжение:

- A) которое материал образца выдерживает без отклонения от закона Гука.
- B) при котором образец деформируется под действием практически неизменной растягивающей нагрузки.
- C) после снятия которого не наблюдается остаточных деформаций материала.
- D) характеризующее сопротивление максимальной равномерной деформации.
- E) при котором происходит разрыв образца.

51. Символ $\sigma_{0,2}$ обозначает:

- A) предел прочности на растяжение.
- B) предел пропорциональности.
- C) условный предел текучести.
- D) предел упругости.
- E) сопротивление разрыву.

52. Символом σ_B обозначается:

- A) предел прочности на растяжение.
- B) предел пропорциональности.
- C) условный предел текучести.
- D) предел упругости.
- E) сопротивление разрыву.

53. Для экспериментально определения относительного сужения после разрыва образца достаточно:

- A) узнать коэффициент Пуассона.
- B) определить нагрузку, при которой произошел разрыв.
- C) оценить работу, затраченную на разрыв.
- D) провести разрыв при определённой температуре.
- E) измерить его минимальный диаметр в месте разрыва.

54. Полная работа на пластическую деформацию равна:

- A) $A = S \cdot e$.
- B) $A = \int_0^{l_k} S \cdot de$.
- C) $A = S \cdot \cos\theta \cdot \cos\gamma$.
- D) $A = \int_{l_0}^{M_k} P dl$.

$$E) A = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi r^4 G}{2H}}$$

55. Тело, предназначенное для внедрения в образец для проверки его твердости, называется:

- A) твердомер.
- B) индентор.
- C) дефектоскоп.
- D) индикатор.
- E) вкладыш.

56. Поверхностные дефекты (окалина, выбоины, вмятины и т. д.) при определении твёрдости:

- A) должны присутствовать на поверхности образца.
- B) должны быть удалены с поверхности образца.
- C) не влияют на точность измерения.
- D) влияют на точность измерения, но наклёп устраняет это влияние.
- E) позволяют точнее оценить твёрдость металла.

57. Плоскость испытываемой поверхности при определении твердости:

- A) должна быть наклонена под углом 45° к опорной поверхности.
- B) должна быть наклонена под углом 60° к опорной поверхности.
- C) может находиться под любым углом по отношению к опорной поверхности.
- D) должна быть строго перпендикулярна опорной поверхности.
- E) должна быть строго параллельна опорной поверхности.

58. Стальной шарик с $D=10$ мм, нагрузка $P=3000$ кгс и время выдержки $\tau=10$ с. используются при определении твёрдости по:

- A) Бринеллю.
- B) Роквеллу (по шкала А).
- C) Виккерсу.
- D) микротвёрдости.
- E) Роквеллу (по шкала В).

59. Алмазный конус с углом при вершине 120° и радиусом закругления $0,2$ мм используется при определении твёрдости по:

- A) Бринеллю.
- B) Роквеллу (по шкала А).
- C) Виккерсу.
- D) микротвёрдости.
- E) Роквеллу (по шкала В).

60. Стальной шарик диаметром $1,5875$ мм используют при определении твердости по:

- A) Бринеллю.

- В) Роквеллу (по шкала А).
- С) Виккерсу.
- Д) микротвёрдости.
- Е) Роквеллу (по шкала В).

61. Предварительная и общая нагрузки используются при определении твердости по:

- А) Бринеллю.
- В) Шору.
- С) Виккерсу.
- Д) микротвёрдости.
- Е) Роквеллу.

62. Число микротвёрдости Н определяется по формуле:

А) $H=100-e$.

В) $H=130-e$.

С) $H = \frac{P}{\frac{\pi \cdot D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$.

Д) $H=1854 \cdot P/d^2$.

Е) $H=P/F$.

63. По высоте отскока бойка определяют твердость по:

- А) Бринеллю.
- В) Шору.
- С) Виккерсу.
- Д) микротвёрдости.
- Е) Роквеллу.

64. Твердость в тонких сечениях, поверхностных слоях определяют по:

- А) Бринеллю.
- В) Шору.
- С) Виккерсу.
- Д) микротвёрдости.
- Е) Роквеллу.

65. Для оценки твердости отдельных фаз или структурных составляющих сплавов применяют метод:

- А) по Бринеллю.
- В) по Шору.
- С) по Виккерсу.
- Д) микротвёрдости.
- Е) по Роквеллу.

66. НВ – это твердость по

- A) Бринеллю.
- B) Шору.
- C) Виккерсу.
- D) микротвёрдости.
- E) Роквеллу.

67. HV – это твердость по:

- A) Бринеллю.
- B) Шору.
- C) Виккерсу.
- D) микротвёрдости.
- E) Роквеллу.

68. HRC – это твердость по:

- A) Бринеллю.
- B) Шору.
- C) Виккерсу.
- D) микротвёрдости.
- E) Роквеллу.

69. HSD – это твердость по:

- A) Бринеллю.
- B) Шору.
- C) Виккерсу.
- D) микротвёрдости.
- E) Роквеллу.

70. Для устранения перекоса образца усилие сжатия следует:

- A) свести к минимуму.
- B) передавать на образец с помощью направляющего приспособления.
- C) оказывать на образец в нескольких местах (двух-трёх).
- D) оказывать на образец строго вдоль оси.
- E) прикладывать к самой широкой части образца.

71. Шаровой вкладыш в верхнем захвате в машинах на сжатие используется для:

- A) изменения скорости подачи нагрузки на образец.
- B) регулировки приложения нагрузки.
- C) устранения перекоса образца.
- D) точности совмещения осей прикладываемой нагрузки и образца.
- E) начальной деформации образца.

72. По мере сжатия на торцевых поверхностях образца возникают силы:

- A) инерции.
- B) адгезии.

- С) тяжести.
- Д) поверхностного натяжения.
- Е) трения.

73. Деформации в горизонтальном направлении препятствуют возникающая при сжатии сила:

- А) инерции.
- В) адгезии.
- С) тяжести.
- Д) поверхностного натяжения.
- Е) трения.

74. При сжатии образец приобретает характерную бочкообразную форму в результате сил:

- А) инерции.
- В) адгезии.
- С) тяжести.
- Д) поверхностного натяжения.
- Е) трения.

75. Разрушение срезом при испытаниях на сжатие наблюдается при:

- А) при повышенных контактных силах трения.
- В) при повышенных температурах проведения испытания.
- С) при высоких силах поверхностного натяжения.
- Д) при значительных силах адгезии.
- Е) в условиях низкого влияния гравитационных сил.

76. Разрушение путем отрыва при испытаниях на сжатие наблюдается при:

- А) при небольших контактных силах трения.
- В) при повышенных температурах проведения испытания.
- С) при высоких силах поверхностного натяжения.
- Д) при значительных силах адгезии.
- Е) в условиях низкого влияния гравитационных сил.

77. Для оценки температур перехода из хрупкого состояния в пластическое удобны испытания на:

- А) кручение.
- В) длительную прочность.
- С) изгиб.
- Д) сжатие.
- Е) разрушение.

78. Наибольшее применение при испытаниях на изгиб нашла схема нагружения с приложением нагрузки:

- А) сосредоточенной силой на середине расстояния между опорами.

- В) на крайние точки образца.
- С) в двух точках на одинаковом расстоянии от опор.
- Д) в трёх точках с одинаковыми расстояниями между ними.
- Е) в нескольких точках (более трёх) с неравномерным расстоянием между ними.

79. В изгибаемом образце, верхняя и нижняя части оказываются:

- А) в недеформированном состоянии.
- В) сжатыми.
- С) растянутыми.
- Д) нижняя часть – сжата, верхняя – растянута.
- Е) нижняя часть – растянута, верхняя – сжата.

80. Для оценки характеристик конструктивной прочности при изгибе рекомендуется применять образцы сечением (мм):

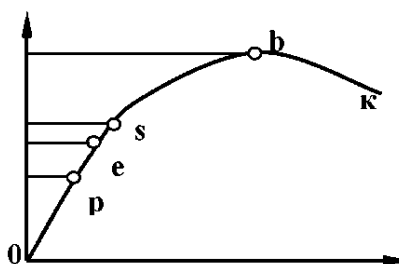
- А) 10×10 .
- В) 15×30 .
- С) 30×30 .
- Д) 30×60 .
- Е) 60×60 .

81. До разрушения при испытании на кручение можно довести:

- А) только хрупкие материалы.
- В) только высокопластичные материалы.
- С) неметаллические материалы.
- Д) металлы с малым коэффициентом Пуассона.
- Е) любой материал.

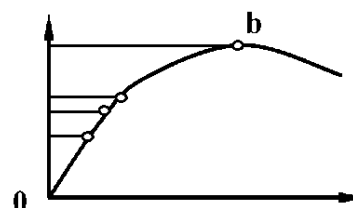
82. В какой точке диаграммы произойдёт разрушение хрупкого металла?

- А) о.
- В) р.
- С) е.
- Д) s.
- Е) b.



83. У пластически деформирующихся образцов точка максимума b на диаграмме изгиба часто совпадает:

- А) с разрушением.
- В) с появлением первой трещины.
- С) с началом пластической деформации.
- Д) с появлением текучести.
- Е) с началом движения дислокаций.



84. Наибольшие нормальные напряжения при кручении действуют под углом:

- A) 15° .
- B) 30° .
- C) 45° .
- D) 60° .
- E) 90° .

85. Важным следствием неизменности напряжённого состояния при испытаниях на кручение является:

- A) невозможность довести до разрушения неметаллические материалы.
- B) снижение коэффициента Пуассона.
- C) пониженные тангенциальные и нормальные напряжения.
- D) постоянство рабочей длины и поперечного сечения образца во время испытания.
- E) высокий крутящий момент на торцах образца.

86. Основной характеристикой пластичности при кручении является:

- A) относительное удлинение.
- B) относительный сдвиг.
- C) относительное сужение.
- D) абсолютное удлинение.
- E) относительная деформация.

87. При динамических испытаниях надрез на образец наносится:

- A) на торцевой части.
- B) по середине длины.
- C) по краям.
- D) в центре, вдоль осевой линии.
- E) в произвольном месте.

88. Ударную вязкость можно определить по формуле:

- A) $a_H = PL(\cos\beta - \cos\alpha)$.
- B) $a_H = P(H-h)$.
- C) $a_H = A_H/F$.
- D) $a_H = L(1 - \cos\beta)$.
- E) $a_H = A_H - A_{упр} - A_{пл}$.

89. При ударных испытаниях на изгиб образцов с надрезом напряжения и пластическая деформация концентрируются в образце:

- A) на торцах образца.
- B) вокруг надреза.
- C) равномерно по всему сечению.
- D) вдоль продольной оси центра.

Е) в обе стороны от места приложения удара.

90. Возникновение схемы объёмного растяжения, концентрация напряжений у надреза и рост предела текучести в результате ускорения деформации создают благоприятные условия для:

- А) пластической деформации.
- В) уменьшения количества дислокаций в кристаллах.
- С) хрупкого разрушения.
- Д) деформационного упрочнения.
- Е) релаксации напряжений.

91. Ударная вязкость при динамических испытаниях образцов с надрезом:

- А) прямо пропорциональна полной работе A_{II} .
- В) обратно пропорциональна полной работе A_{II} .
- С) равна полной работе A_{II} .
- Д) не определяется.
- Е) равна нулю.

92. В условиях действия циклических напряжений в металлах и сплавах происходит зарождение и постепенное развитие трещин, вызывающее в конечном итоге:

- А) пластическую деформацию.
- В) переход одного типа кристаллической решётки в другой.
- С) полное разрушение образца.
- Д) изменение величины предела прочности.
- Е) эффект сверхпластичности.

93. Процесс постепенного накопления повреждений в материале под действием циклических нагрузок, приводящий к уменьшению долговечности из-за образования трещин и разрушения, называют:

- А) деформацией.
- В) упругостью.
- С) усталостью.
- Д) жёсткостью.
- Е) вязкостью.

94. Свойство противостоять усталости называется:

- А) деформацией.
- В) упругостью.
- С) износостойкостью.
- Д) жёсткостью.
- Е) выносливостью.

95. Усталостная трещина зарождается:

- А) в поверхностных слоях.

- В) по середине длины.
- С) в центре продольной оси.
- Д) на торцах образца.
- Е) в той части образца, которую нельзя заранее предсказать.

96. Усталостная трещина развивается:

- А) по поверхности.
- В) от центра к торцам.
- С) от торцевой части к середине длины.
- Д) вглубь.
- Е) немедленно по всему объёму.

97. В процессе любого усталостного испытания на образец действуют:

- А) статические напряжения, непрерывно изменяющиеся часто по знаку, но постоянные по величине.
- В) динамические напряжения, не изменяющиеся по знаку, но переменные по величине.
- С) циклические напряжения, непрерывно изменяющиеся по величине и часто по знаку.
- Д) динамические напряжения, не изменяющиеся по величине, но переменные по знаку.
- Е) циклические напряжения, не изменяющиеся по величине, но часто по знаку.

98. Наибольшее по алгебраической величине напряжение в циклических испытаниях принимают за:

- А) среднее напряжение цикла.
- В) максимальное напряжение цикла.
- С) наименьшее напряжение цикла.
- Д) амплитуду напряжений цикла.
- Е) коэффициент асимметрии.

99. Цикл называют симметричным, если:

- А) $R_\sigma = 0$.
- В) $R_\sigma = -1$.
- С) $R_\sigma = 2$.
- Д) $R_\sigma = -3$.
- Е) $R_\sigma = 5$.

100. Наиболее распространённая схема нагружения при усталостных испытаниях:

- А) сжатие.
- В) растяжение.
- С) изгиб.
- Д) кручение.
- Е) срез.

101. Наибольшее значение максимального предела цикла, при действии которого не происходит усталостного разрушения образца после произвольно большого или заданного числа циклов нагружения называется пределом:

- A) прочности.
- B) текучести.
- C) усталости.
- D) упругости.
- E) выносливости.

102. Наибольшее напряжение, которое материал выдерживает, не разрушаясь в течение определённого числа циклов нагружения, называют:

- A) циклом напряжений.
- B) пределом выносливости.
- C) амплитудой напряжений.
- D) эффективным коэффициентом напряжений.
- E) базой испытания.

103. Кривую усталости ставят в координатах «максимальное напряжения цикла – ...»?

- A) температура.
- B) время.
- C) долговечность.
- D) число циклов.
- E) амплитуда напряжений.

104. Свойство металлов и сплавов работать под напряжением в условиях повышенных температур без заметной остаточной деформации и разрушения называется:

- A) долговечность.
- B) жаропрочность.
- C) жаростойкость.
- D) прочность.
- E) ползучесть.

105. Явление непрерывной деформации под действием постоянного напряжения называется:

- A) долговечность.
- B) жаропрочность.
- C) жаростойкость.
- D) прочность.
- E) ползучесть.

106. Логарифмическая ползучесть иначе называется:

- A) высокотемпературная ползучесть.

- В) диффузионная ползучесть.
- С) низкотемпературная ползучесть.
- Д) неупругая ползучесть.
- Е) жаропрочная ползучесть.

107. Обратимая ползучесть ещё носит название:

- А) высокотемпературная ползучесть.
- В) диффузионная ползучесть.
- С) низкотемпературная ползучесть.
- Д) неупругая ползучесть.
- Е) жаропрочная ползучесть.

108. Основное отличие высокотемпературной ползучести от низкотемпературной заключается:

- А) в скорости развития трещины.
- В) в температуре проведения испытаний.
- С) во внутренних напряжениях, непрерывно изменяющихся по величине и часто по знаку.
- Д) в типе кристаллической решётки, где происходит движение дислокаций.
- Е) в более полном протекании возврата.

109. Чем определяется более полное протекание возврата при низкотемпературной ползучести?

- А) переползанием дислокаций.
- В) о.ц.к. решёткой.
- С) высокой внутренней энергией.
- Д) повышенной пластичностью.
- Е) дисперсным упрочнением металлов и сплавов.

110. Скорость какого вида ползучести контролируется наиболее медленным процессом переползания дислокаций?

- А) логарифмической.
- В) высокотемпературной.
- С) начальной.
- Д) установившейся.
- Е) медленной.

111. Какая структура формируется в металле в результате возврата при высокотемпературной ползучести?

- А) кристаллическая.
- В) гомогенная.
- С) изотропная.
- Д) полигональная.
- Е) двойная.

112. Поперечное скольжение и переползание дислокаций - это основные процессы, определяющие при ползучести:

- A) отдых.
- B) возврат.
- C) полигонизацию.
- D) собирательную рекристаллизацию.
- E) отпуск.

113. Что обозначает нижний индекс предела ползучести σ ?

- A) скорость ползучести.
- B) температуру испытания.
- C) время испытания.
- D) относительное удлинение.
- E) диаметр образца.

114. Что обозначает верхний индекс предела ползучести σ ?

- A) скорость ползучести.
- B) температуру испытания.
- C) время испытания.
- D) относительное удлинение.
- E) диаметр образца.

115. Форма и размеры головок образцов для испытаний на ползучесть определяются:

- A) по формуле $l_0=5d_0$.
- B) структурой металла или сплава.
- C) сечением рабочей части образца.
- D) температурой испытаний.
- E) конструкцией захватов испытательной машиной.

116. Испытания на ползучесть продолжаются в течение:

- A) доли секунды.
- B) нескольких секунд.
- C) нескольких минут.
- D) 5-10 часов.
- E) тысячи часов.

117. Нагрузка на образец при испытании на ползучесть подаётся обычно через:

- A) маятник.
- B) индентор.
- C) рычажный механизм.
- D) эксцентриковый механизм.
- E) гидроусилитель.

118. Верхний захват машины ИП-2 для испытаний на ползучесть связан с:

- A) рычажной системой.
- B) механизмом, обеспечивающим перемещение образца вдоль вертикальной оси печи.
- C) гидроусилителем.
- D) маятником.
- E) управлением нагрузкой.

119. Для измерения температуры на образце для испытаний на ползучесть устанавливаются:

- A) терморегуляторы.
- B) термопары.
- C) пирометры.
- D) инденторы.
- E) катетометры.

120. На какой стадии прекращают испытания на ползучесть?

- A) начальной ползучести.
- B) конечной ползучести.
- C) установившейся ползучести.
- D) катастрофической ползучести.
- E) средней ползучести.

121. Процесс разрушения начинается с образования:

- A) дислокаций.
- B) пластической деформации.
- C) внутренних напряжений.
- D) трещин.
- E) концентратора напряжений.

122. Процесс разрушения заканчивается:

- A) скольжением дислокаций за пределы собственных кристаллов.
- B) образованием трещин.
- C) образованием дислокаций.
- D) изменением формы и размеров сечения.
- E) разделением образца на отдельные части.

123. Какие напряжения сами по себе не могут вызвать разрушения?

- A) сжимающие.
- B) растягивающие.
- C) касательные.
- D) дискретные.
- E) нормальные.

124. Срез происходит под действием:

- A) растягивающих напряжений.

- В) сжимающих напряжений.
- С) касательных напряжений.
- Д) нормальных напряжений.
- Е) длительных напряжений.

125. Отрыв происходит в результате действия:

- А) растягивающих напряжений.
- В) сжимающих напряжений.
- С) касательных напряжений.
- Д) нормальных напряжений.
- Е) длительных напряжений.

126. Внутризеренное разрушение иначе называют:

- А) транскристаллитным.
- В) интеркристаллитным.
- С) межкристаллитным.
- Д) монокристаллитным.
- Е) поликристаллитным.

127. Межзеренное разрушение иначе называют:

- А) транскристаллитным.
- В) интеркристаллитным.
- С) межкристаллитным.
- Д) монокристаллитным.
- Е) поликристаллитным.

128. При разрушении трещина образуется в плоскости:

- А) перпендикулярной плоскости скольжения дислокаций.
- В) параллельной плоскости скольжения дислокаций.
- С) перпендикулярной зародышевой трещины.
- Д) параллельной зародышевой трещины.
- Е) скольжения дислокаций.

129. Зарождению трещин всегда предшествует:

- А) пластическая деформация.
- В) повышение температуры.
- С) градиент концентрации.
- Д) появление точечных дефектов.
- Е) появление поверхностных дефектов.

130. Сколько напряжений включает понятие «тензор напряжений»?

- А) два.
- В) шесть.
- С) девять.
- Д) двенадцать.

Е) двадцать четыре.

131. Уменьшение линейных размеров при трении деталей называется:

- А) изнашиванием.
- В) скоростью изнашивания.
- С) износостойкостью.
- Д) пределом изнашивания.
- Е) выносливостью.

132. Свойство металла противостоять износу называется:

- А) изнашиванием.
- В) скоростью изнашивания.
- С) износостойкостью.
- Д) пределом изнашивания.
- Е) выносливостью.

133. Вымывание поверхности детали замкнутым потоком среды, смешанной часто с твёрдыми частицами называется:

- А) изнашиванием.
- В) износостойкостью.
- С) коррозией.
- Д) эрозией.
- Е) трением.

134. Самый распространённый износ – это:

- А) абразивный износ.
- В) износ от эрозии.
- С) износ от трения качения.
- Д) износ от коррозии.
- Е) износ от трения скольжения.

135. При трении качения возникают:

- А) переменные напряжения в поверхностном слое.
- В) наклёп.
- С) оксидная плёнка.
- Д) изменение структуры стали.
- Е) увеличение зерна.

136. Вязкое разрушение происходит:

- А) без пластической деформации.
- В) после начала пластической деформации.
- С) после значительной пластической деформации.
- Д) только в условиях предшествующего хрупкого разрушения.
- Е) без всякой деформации.

137. Вблизи центра образца при вязком разрушении:

- A) максимально продольное напряжение.
- B) максимально касательное напряжение.
- C) максимально растягивающее напряжение.
- D) максимально сжимающее напряжение.
- E) все напряжения максимальны.

138. Трещины при вязком разрушении возникают и развиваются:

- A) в средней части сечения шейки образца.
- B) по краям сечения шейки образца.
- C) около краев шейки образца.
- D) в точке приложения нагрузки на образец.
- E) по окружности точки приложенной нагрузки.

139. При растяжении цилиндрических образцов с высокой пластичностью относительное сужение близко к:

- A) нулю.
- B) 50 %.
- C) 100 %.
- D) 10 %.
- E) центру приложения нагрузки.

140. Если относительное сужение составляет ~100 %, то шейка на образце:

- A) не образуется.
- B) превращается в точку.
- C) раздваивается.
- D) имеет форму четырёхугольника.
- E) вытягивается в сторону, перпендикулярную приложенной нагрузке.

141. Термин “синергетика” произошёл от греческого слова “синергия”, означающий:

- A) поток.
- B) подсистема
- C) вещество.
- D) содействие.
- E) энергия.

142. Научное направление, изучающее связи между элементами структуры, которые образуются в открытых системах благодаря интенсивному обмену веществом и энергией с окружающей средой в неравновесных условиях называется:

- A) нанотехника.
- B) синергетика.
- C) механика разрушения.
- D) линейная динамика.

Е) теплотехника.

143. Относительное сужение определяют по формуле:

А) $\psi = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%$.

В) $\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%$.

С) $\psi = \ln \frac{F_k}{F_0}$.

Д) $\psi = S_{\max} - S_{\min} / 2$.

Е) $\psi = \begin{pmatrix} S_x & t_{xy} & t_{xz} \\ t_{yx} & S_y & t_{yz} \\ t_{zx} & t_{zy} & S_z \end{pmatrix}$

144. Деформация при температуре ниже $T_{\text{рек}}$ сопровождается:

А) разупрочнением.

В) наклепом.

С) ликвацией.

Д) возвратом.

Е) отдыхом.

145. Под влиянием наклепа металл:

А) сильно разупрочняется.

В) незначительно разупрочняется.

С) упрочняется.

Д) не изменяет своих свойств.

Е) становится равновесным.

146. При нагреве холоднодеформированного металла последний:

А) сильно упрочняется.

В) разупрочняется.

С) упрочняется.

Д) не изменяет своих свойств.

Е) становится равновесным.

147. Напряжение, отвечающее наибольшей нагрузке перед разрушением образца, называется пределом:

А) текучести.

В) прочности.

С) упругости.

Д) пластичности.

Е) твердости.

148. Работа, отнесенная к начальной площади поперечного сечения образца,

представляет собой механическое свойство:

- A) твердость.
- B) прочность.
- C) относительное удлинение.
- D) ударная вязкость.
- E) пластичность.

149. Постепенное образование трещин в металле под действием циклических нагрузок называют:

- A) хрупким изломом.
- B) вязким изломом.
- C) трещиноустойчивостью.
- D) усталостью.
- E) деформацией.

150. Длительное воздействие на металл повторно-переменных напряжений может вызвать образование:

- A) раковин.
- B) текстуры деформации.
- C) полосчатости.
- D) трещин.
- E) наклепа.

151. Возникновение микротрещин чаще всего происходит благодаря скоплению перед препятствием движущихся:

- A) вакансий.
- B) дислокаций.
- C) примесных атомов.
- D) дислоцированных атомов.
- E) плоскостей.

152. При транскристаллитном разрушении трещина распространяется по телу:

- A) зерна.
- B) дислокаций.
- C) образца.
- D) вакансии.
- E) макрошлифа.

153. При интеркристаллитном разрушении трещина распространяется:

- A) по телу зерна.
- B) по границам зерен.
- C) по поверхности образца.
- D) от поверхности вглубь образца.
- E) к поверхности макрошлифа.

154. Пластическая деформация осуществляется скольжением и:

- A) смещением.
- B) сдвигом.
- C) торможением.
- D) перемещением.
- E) двойникованием.

155. Деформация, влияние которой устраняется после прекращения действия внешних сил, называется:

- A) пластической.
- B) остаточной.
- C) упругой.
- D) нормальной.
- E) касательной.

156. При деформации скольжение происходит не за счет жесткого сдвига, а в результате перемещения в кристалле:

- A) вакансий.
- B) дислокаций.
- C) примесных атомов.
- D) дислоцированных атомов.
- E) плоскостей.

157. Процесс образования новых равноосных зерен взамен деформированных, вытянутых, называется:

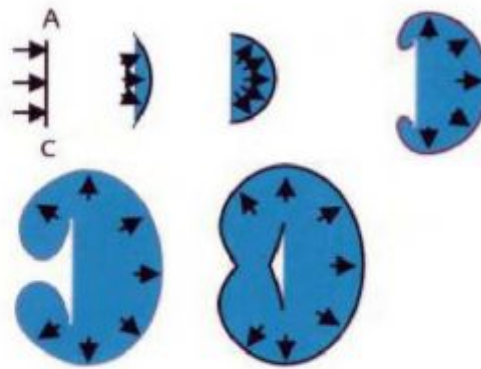
- A) кристаллизаций.
- B) вторичной кристаллизацией.
- C) рекристаллизацией.
- D) возвратом.
- E) отдыхом.

158. Когда скольжение затруднено пластическая деформация осуществляется:

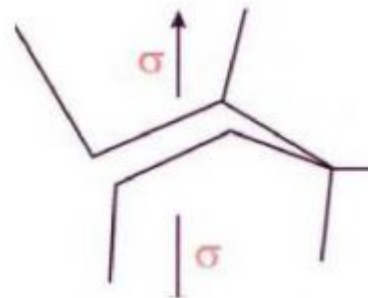
- A) смещением.
- B) сдвигом.
- C) торможением.
- D) перемещением.
- E) двойникованием.

159. На рисунке приведена схема образования:

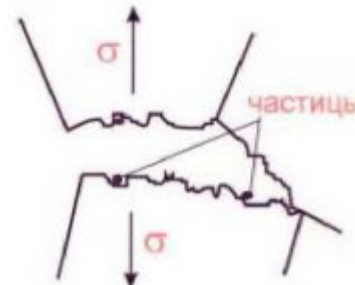
- A) вакансий.
- B) дислокаций.
- C) примесных атомов.
- D) дислоцированных атомов.
- E) границ зерен.



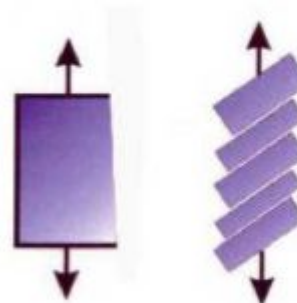
160. На рисунке приведена схема:
- A) хрупкого разрушения.
 - B) вязкого разрушения.
 - C) образования дислокаций.
 - D) пластической деформации скольжением.
 - E) пластической деформации двойникованием.



161. На рисунке приведена схема:
- A) хрупкого разрушения.
 - B) вязкого разрушения.
 - C) образования дислокаций.
 - D) пластической деформации скольжением.
 - E) пластической деформации двойникованием.

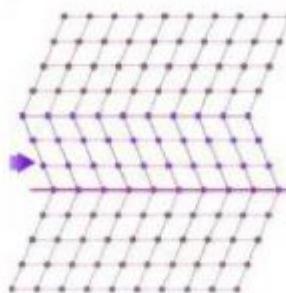


162. На рисунке приведена схема:
- A) хрупкого разрушения.
 - B) вязкого разрушения.
 - C) образования дислокаций.
 - D) пластической деформации скольжением.
 - E) пластической деформации двойникованием.



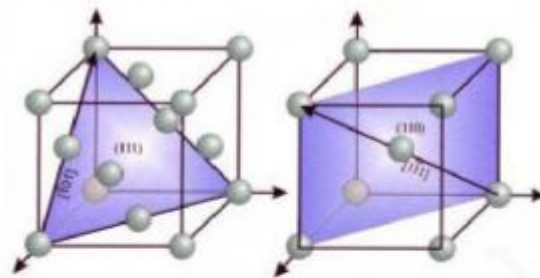
163. На рисунке приведена схема:

- A) хрупкого разрушения.
- B) вязкого разрушения.
- C) образования дислокаций.
- D) пластической деформации скольжением.
- E) пластической деформации двойникованием.



164. Выделенные области – это плоскости и направления:

- A) хрупкого разрушения.
- B) вязкого разрушения.
- C) образования дислокаций.
- D) скольжения.
- E) двойникования.

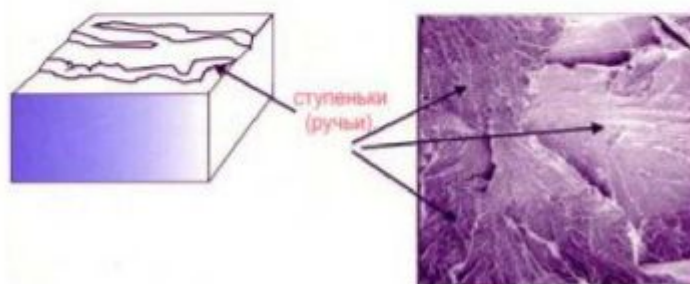


165. Преимущественная пространственная ориентировка кристаллической решетки зерен называется:

- A) изотропия.
- B) текстура деформации.
- C) полосчатость.
- D) строчечность.
- E) полиморфизм.

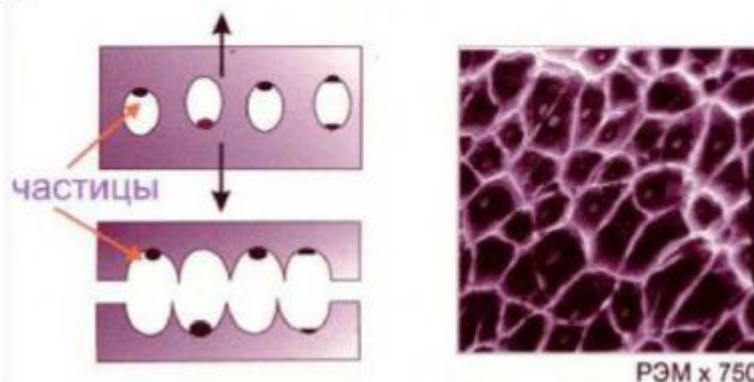
166. На рисунке приведена схема:

- A) хрупкого разрушения.
- B) вязкого разрушения.
- C) образования дислокаций.
- D) пластической деформации скольжением.
- E) пластической деформации двойникованием.



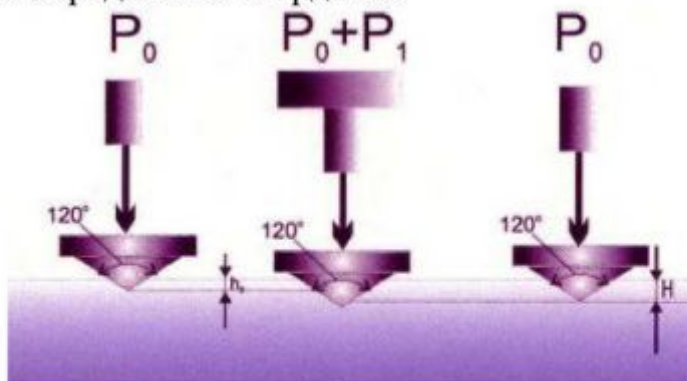
167. На рисунке приведена схема:

- A) хрупкого разрушения.
- B) вязкого разрушения.
- C) образования дислокаций.
- D) пластической деформации скольжением.
- E) пластической деформации двойникованием.



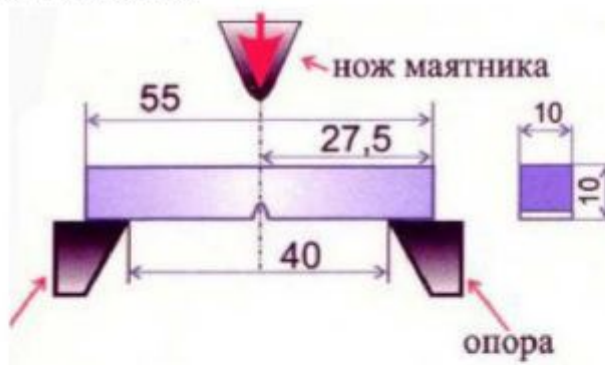
168. На рисунке приведена схема определения твердости:

- A) по Роквеллу.
- B) по Шору.
- C) по Бринеллю.
- D) по Виккерсу.
- E) микро.



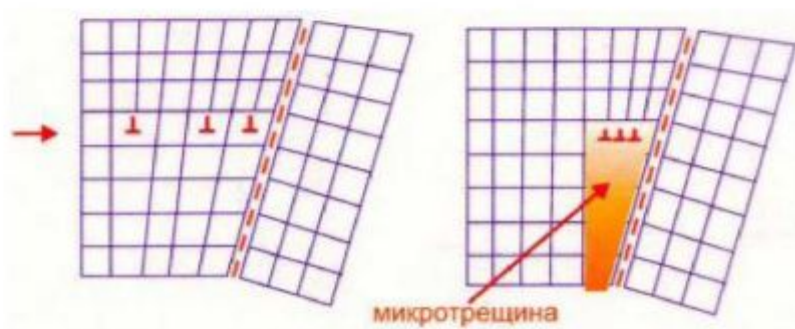
169. На рисунке приведена схема испытаний на:

- A) твердость.
- B) усталость.
- C) ползучесть.
- D) ударную вязкость.
- E) износостойкость.



170. На рисунке приведена схема зарождения микротрещины при:

- A) слиянии дислокаций у препятствия.
- B) переползании дислокаций.
- C) уничтожении дислокаций.
- D) пересечении двух плоскостей скольжения.
- E) пластической деформации двойникованием.



171. На рисунке приведена схема зарождения микротрещины при:

- A) слиянии дислокаций у препятствия.
- B) переползании дислокаций.
- C) уничтожении дислокаций.
- D) пересечении двух плоскостей скольжения.
- E) пластической деформации двойникованием.



172. Стадия возврата при которой в пределах каждого кристалла образуются новые малоугловые границы называется:

- A) рекристаллизацией.
- B) отдыхом.
- C) полигонизацией.
- D) вторичной кристаллизацией.
- E) собирательной рекристаллизацией.

173. Изменения тонкой структуры и свойств, которые не сопровождаются изменением микроструктуры называются:

- A) рекристаллизацией.
- B) отдыхом.
- C) полигонизацией.
- D) вторичной кристаллизацией.
- E) возвратом.

174. Наименьшая температура нагрева, обеспечивающая возможность зарождения новых зерен в деформированном металле, называется температурой:

- A) рекристаллизацией.
- B) плавления.
- C) кристаллизации.
- D) кипения.
- E) испарения.

175. Какая структура металла изменяется при возврате?

- A) микроструктура.
- B) макроструктура.
- C) тонкая структура.
- D) структура деформации.
- E) все перечисленное.

176. Какое свойство не относится к механическим?

- A) твердость.
- B) теплостойкость.
- C) износостойкость.
- D) пластичность.
- E) ударная вязкость.

177. Какое свойство относится к механическим?

- A) окисляемость.
- B) теплостойкость.
- C) износостойкость.
- D) теплопроводность.
- E) свариваемость.

178. KCU, KCT, KCV – это:

- A) твердость.
- B) теплостойкость.
- C) износостойкость.
- D) пластичность.
- E) ударная вязкость.

179. HB, HV, HRC – это:

- A) твердость.
- B) теплостойкость.
- C) износостойкость.
- D) пластичность.
- E) ударная вязкость.

180. Символом ψ обозначается:

- A) твердость.
- B) предел прочности на растяжение.
- C) относительное удлинение.
- D) относительное сужение.
- E) ударная вязкость.

181. Символом δ обозначается:

- A) твердость.
- B) предел прочности на растяжение.
- C) относительное удлинение.
- D) относительное сужение.
- E) ударная вязкость.

182. Символом K_{1c} обозначается:

- A) вязкость разрушения.
- B) предел прочности на растяжение.
- C) относительное удлинение.
- D) относительное сужение.
- E) ударная вязкость.

183. Символом σ_R обозначается:

- A) твердость.
- B) предел прочности на растяжение.
- C) предел выносливости.
- D) относительное сужение.
- E) ударная вязкость.

184. Свойство металла противостоять хрупкому разрушению называется:

- A) твердость.

- В) износостойкость.
- С) выносливость.
- Д) надежность.
- Е) ударная вязкость.

185. Каким параметром оценивают пригодность материала для сосудов давления, трубопроводов?

- А) KCV.
- В) KCT.
- С) KCU.
- Д) σ_R .
- Е) K_{1c} .

186. Какой параметр характеризует работу развития трещины при ударном изгибе?

- А) KCV.
- В) KCT.
- С) KCU.
- Д) σ_R .
- Е) K_{1c} .

187. О способности материала работать в условиях циклического нагружения судят по результатам испытаний образцов на:

- А) твердость.
- В) износ.
- С) усталость.
- Д) надежность.
- Е) ударную вязкость.

188. Способность материала работать в поврежденном состоянии после образования трещины называется:

- А) живучесть.
- В) износостойкость.
- С) выносливость.
- Д) надежность.
- Е) ударная вязкость.

189. Для деталей машин, испытывающих длительные циклические нагрузки критерием прочности является:

- А) KCV.
- В) KCT.
- С) KCU.
- Д) σ_R .
- Е) K_{1c} .

190. Способность твердых тел разрушаться при механических воздействиях без заметной пластической деформации называется:

- A) хрупкость.
- B) износ.
- C) выносливость.
- D) надежность.
- E) вязкость.

191. Свойство материала необратимо поглощать энергию при их пластическом деформировании называется:

- A) живучесть.
- B) износостойкость.
- C) хрупкость.
- D) надежность.
- E) вязкость.

192. Поведение металлов при упругой деформации описывается законом:

- A) Пуассона.
- B) Гука.
- C) Ньютона.
- D) Баушингера.
- E) Кулона.

193. Одним из известных проявлений неполной упругости металлов является эффект:

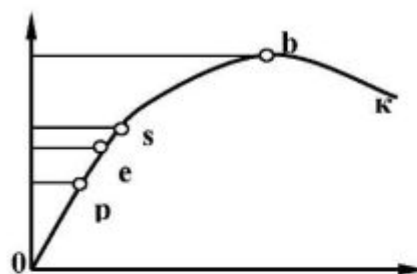
- A) Пуассона.
- B) Гука.
- C) Ньютона.
- D) Баушингера.
- E) Кулона.

194. Неупругие эффекты служат причинами:

- A) повышенной твердости.
- B) внутреннего трения.
- C) пониженной твердости.
- D) низкой пластичности.
- E) коррозии.

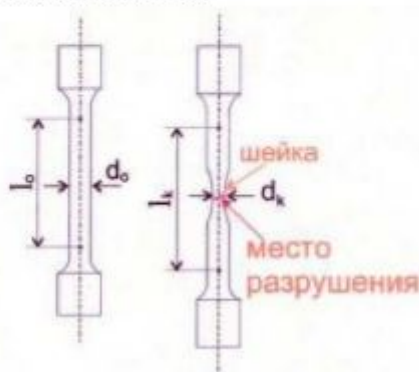
195. Отрезок σ_p определяет величину:

- A) предела прочности.
- B) физического предела текучести.
- C) предела пропорциональности.
- D) условного предела упругости.
- E) вязкости.



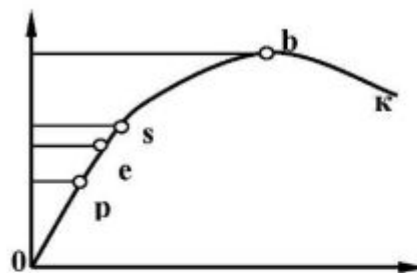
196. На рисунке приведен образец для испытаний на:

- A) растяжение.
- B) износостойкость.
- C) хрупкость.
- D) сжатие.
- E) вязкость.



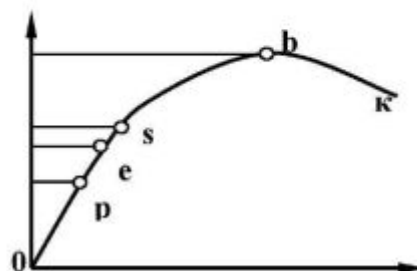
197. Отрезок Oe определяет величину:

- A) предела прочности.
- B) физического предела текучести.
- C) предела пропорциональности.
- D) условного предела упругости.
- E) вязкости.



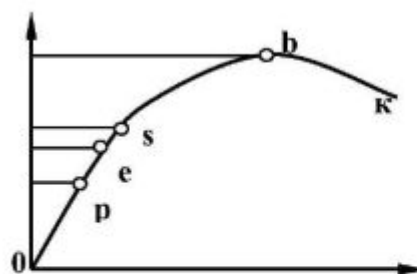
198. Отрезок Os определяет величину:

- A) предела прочности.
- B) физического предела текучести.
- C) предела пропорциональности.
- D) условного предела упругости.
- E) вязкости.



199. Отрезок Ob определяет величину:

- А) предела прочности.
- В) физического предела текучести.
- С) предела пропорциональности.
- Д) условного предела упругости.
- Е) вязкости.



200. На рисунке приведена схема определения твердости:

- А) по Роквеллу.
- В) по Шору.
- С) по Бринеллю.
- Д) по Виккерсу.
- Е) микро.



Ключи правильных ответов

Номер вопроса	Правильный ответ	Номер вопроса	Правильный ответ	Номер вопроса	Правильный ответ	Номер вопроса	Правильный ответ
1	А	51	С	101	Е	151	В
2	В	52	А	102	В	152	А
3	Е	53	Е	103	С	153	В
4	С	54	Д	104	В	154	Е
5	Д	55	В	105	Е	155	С
6	Е	56	В	106	С	156	В
7	А	57	Е	107	Д	157	С
8	В	58	А	108	Е	158	Е
9	Д	59	В	109	А	159	В
10	С	60	Е	110	Д	160	А
11	А	61	Е	111	Д	161	В
12	А	62	Д	112	В	162	Д
13	Д	63	В	113	А	163	Е
14	Д	64	С	114	В	164	Д
15	А	65	Д	115	Е	165	В
16	Е	66	А	116	Е	166	А
17	С	67	С	117	С	167	В
18	В	68	Е	118	В	168	А
19	А	69	Д	119	В	169	Д

1	2	3	4	5	6	7	8
20	E	70	B	120	C	170	A
21	B	71	C	121	D	171	D
22	D	72	E	122	E	172	C
23	D	73	E	123	A	173	E
24	A	74	E	124	C	174	A
25	B	75	A	125	A	175	C
26	B	76	A	126	A	176	B
27	C	77	C	127	B	177	C
28	A	78	A	128	A	178	E
29	C	79	E	129	A	179	A
30	E	80	C	130	C	180	D
31	A	81	E	131	A	181	C
32	D	82	E	132	C	182	A
33	C	83	B	133	D	183	C
34	C	84	C	134	D	184	D
35	C	85	D	135	A	185	A
36	C	86	B	136	C	186	B
37	C	87	D	137	E	187	C
38	C	88	C	138	A	188	A
39	A	89	B	139	C	189	D
40	D	90	C	140	B	190	A
41	E	91	A	141	D	191	E
42	E	92	C	142	B	192	B
43	B	93	C	143	B	193	D
44	D	94	E	144	B	194	B
45	C	95	A	145	C	195	C
46	A	96	D	146	B	196	A
47	D	97	B	147	B	197	D
48	C	98	B	148	D	198	B
49	A	99	B	149	D	199	A
50	D	100	C	150	D	200	C