

Механические свойства материалов и механические испытания материалов

Механические свойства материалов характеризуют их способность «сопротивляться» деформированию и разрушению под действием внешних сил и других воздействий. К основным механическим свойствам материалов относятся: прочность, упругость и пластичность.

Прочность - способность материала сопротивляться разрушению и образованию остаточных деформаций

Упругость – способность материала восстанавливать свою форму и размеры после прекращения действия внешних сил

Пластичность – способность материала получать остаточные деформации.

Механические свойства материалов характеризуются рядом величин, называемых **механическими характеристиками**.

Характеристики статической прочности (предел пропорциональности, предел текучести, временное сопротивление), характеристики пластичности (относительное остаточное удлинение и относительное сужение после разрыва), твёрдость.

Многообразие условий эксплуатации и обработки материалов определяет необходимость проведения большого числа механических испытаний, которые можно классифицировать по различным принципам.

По характеру изменения действующих на образец нагрузок различают **статические, динамические и усталостные испытания**.

Статические испытания характеризуются плавным, относительно медленным (длительностью от нескольких секунд до минуты) возрастанием нагрузки на образец от нуля до некоторой максимальной величины и, соответственно, малой скоростью деформации образца.

В зависимости от схемы приложения нагрузки к образцу различают следующие статические испытания: одноосное растяжение, одноосное сжатие, изгиб, кручение, растяжение и изгиб образца с надрезом и трещиной.

Наиболее важными испытаниями являются те, при которых в образце создается однородное напряжённое состояние (одноосное растяжение, одноосное сжатие, кручение тонкостенного образца). При таких испытаниях определяют основные механические характеристики материала.

Динамические испытания характеризуются приложением к образцу нагрузки с резким изменением её величины и большой скоростью деформации образца. Длительность всего испытания не превышает сотых или тысячных долей секунды. В результате динамических испытаний обычно определяют величину полной и удельной работы динамической деформации, а также величину остаточной деформации образца. Динамические испытания чаще проводят по схеме изгиба.

Испытания на усталость проводят при многократном приложении к образцу изменяющихся (циклических) нагрузок. Такие испытания обычно длительны (часы, десятки и сотни часов), и по их результатам определяют число циклов до разрушения образцов при разных значениях напряжений, а в конечном итоге – то предельное напряжение, которое образец выдерживает без разрушения при заданном числе циклов нагружения.

В процессе испытания может осуществляться «мягкое» или «жёсткое» нагружение образца. При «мягком» нагружении в образце с помощью испытательной установки в соответствии с программой испытаний задается усилие (или напряжение) и измеряются возникающие при этом перемещения и деформации. При «жёстком» нагружении задаются перемещения (или деформации) и измеряются возникающие при этом усилия и напряжения.

Наиболее распространен «жёсткий» способ нагружения, предусматривающий возможность непрерывного измерения и записи силы сопротивления образца деформированию. Он используется почти во всех разновидностях статических испытаний.

«Мягкий» способ нагружения образца реализуется обычно при испытаниях на ползучесть и длительную прочность. Их проводят, как правило, при повышенных температурах по схеме одноосного растяжения для оценки характеристик жаропрочного материала. При испытаниях на ползучесть измеряют величину деформации в зависимости от времени при разных уровнях напряжения в образце, а при испытании на длительную прочность определяют время до разрушения образца под действием заданного напряжения.

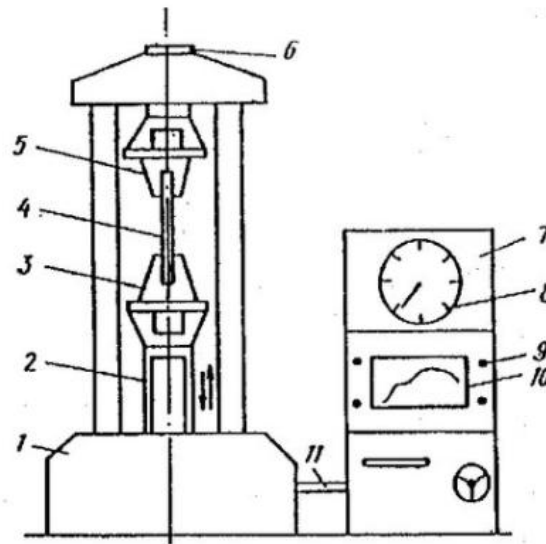
ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

1. ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ
2. ИСПЫТАНИЕ НА СЖАТИЕ
3. ИСПЫТАНИЯ НА СДВИГ
4. ИСПЫТАНИЕ НА ИЗГИБ
5. ИСПЫТАНИЕ НА СКРУЧИВАНИЕ
6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЁРДОСТИ
7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ

ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

1. ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ

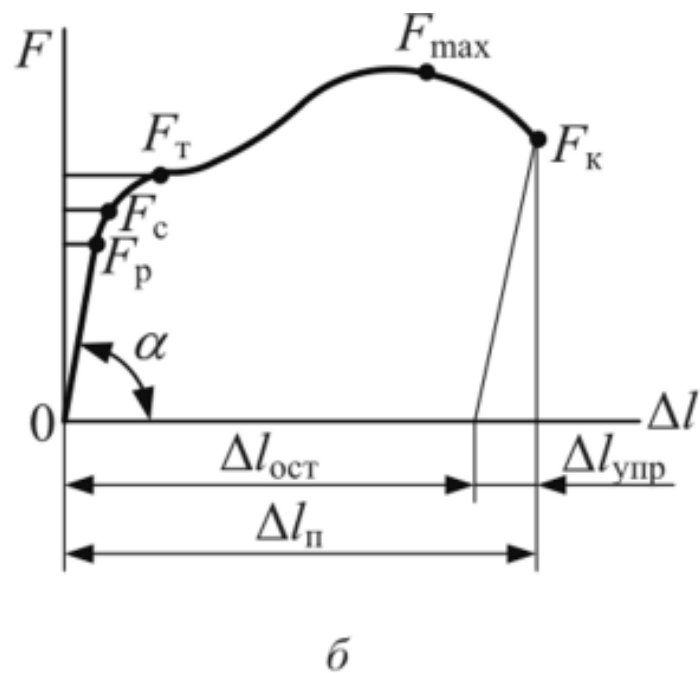
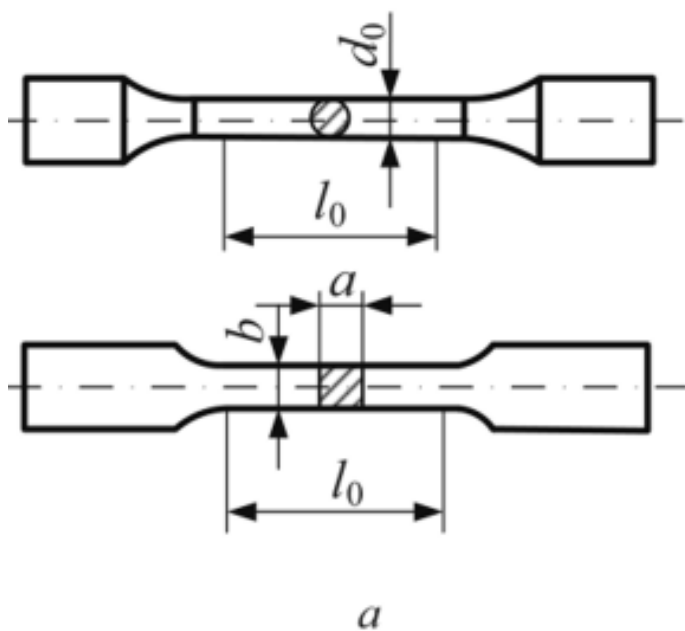
Схема машины для испытания на растяжение



1 – основание; 2 – винт грузовой; 3 – нижний захват (активный); 4 – образец; 5 – верхний захват (пассивный); 6 – силоизмерительный датчик; 7 – пульт управления с электроприводной аппаратурой; 8 – индикатор нагрузок; 9 – рукоятки управления; 10 – диаграммный механизм; 11 – кабель

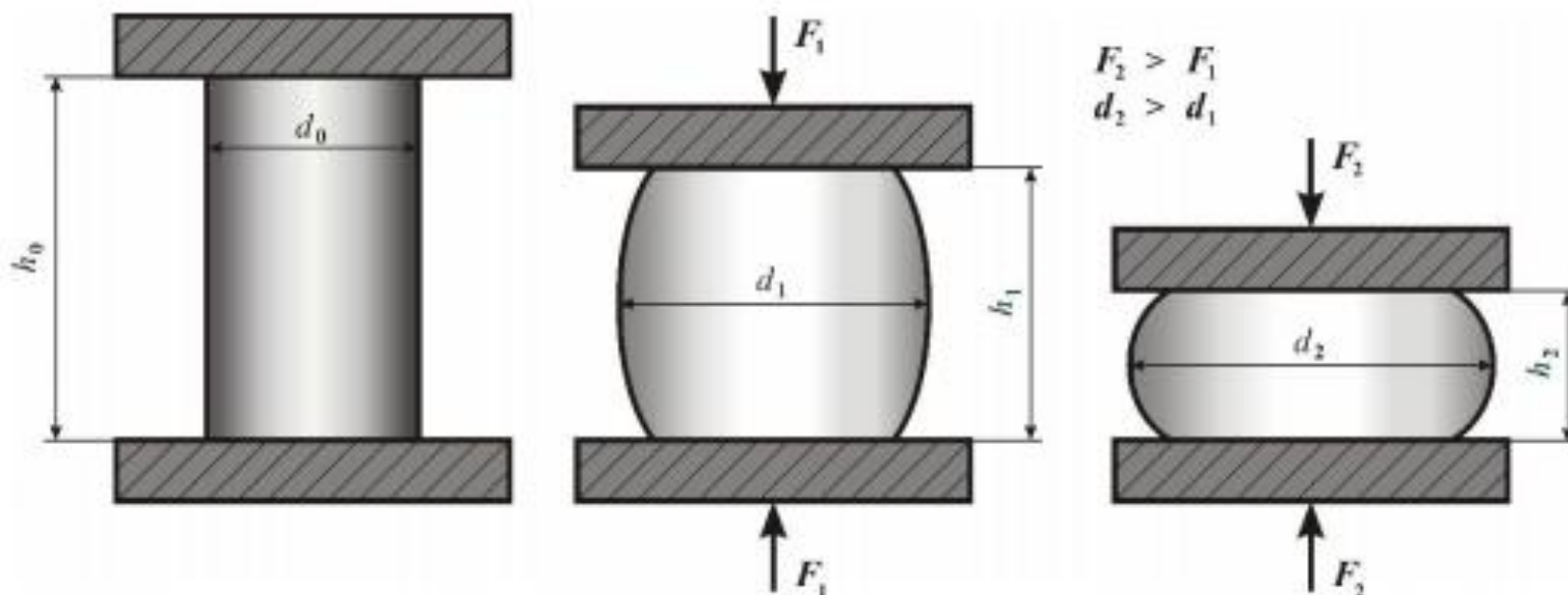
ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

1. ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ



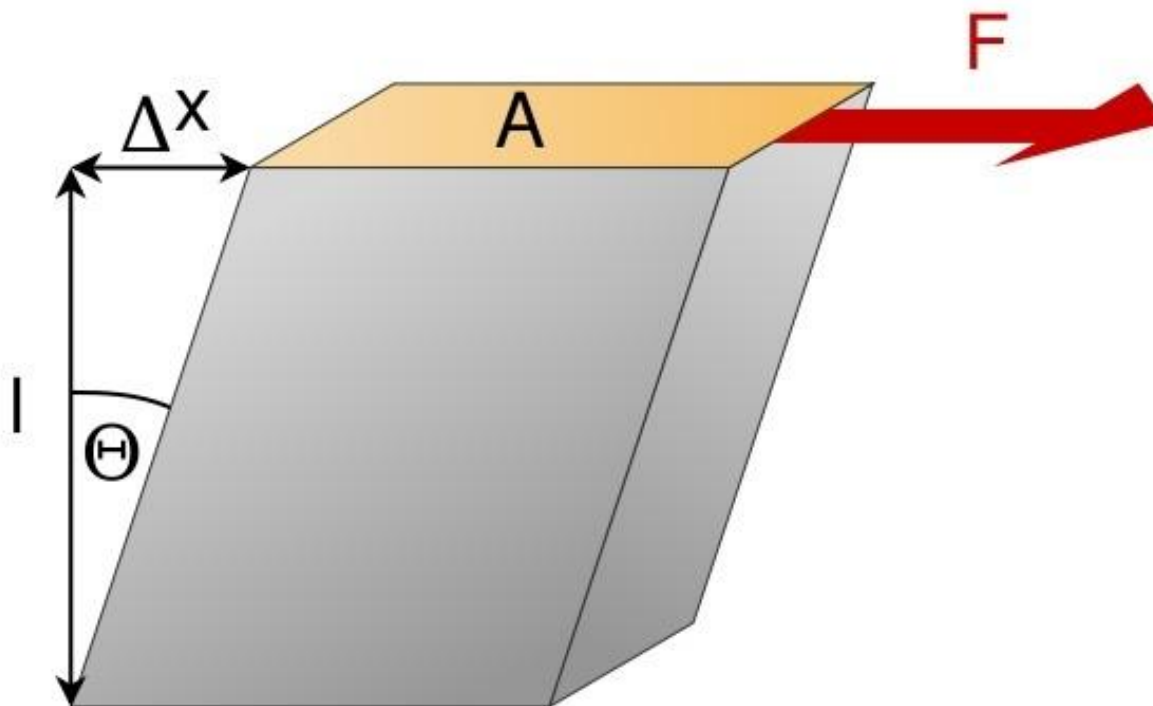
ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

2. ИСПЫТАНИЕ НА СЖАТИЕ



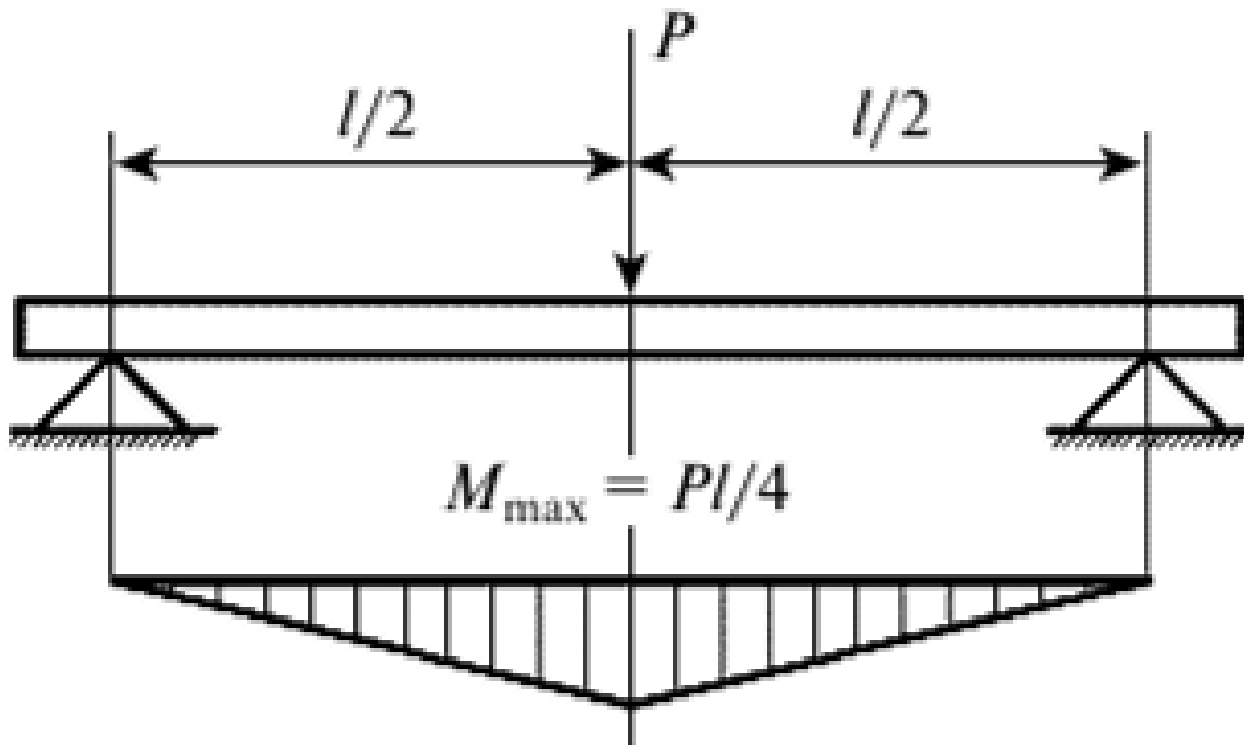
ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

3. ИСПЫТАНИЯ НА СДВИГ



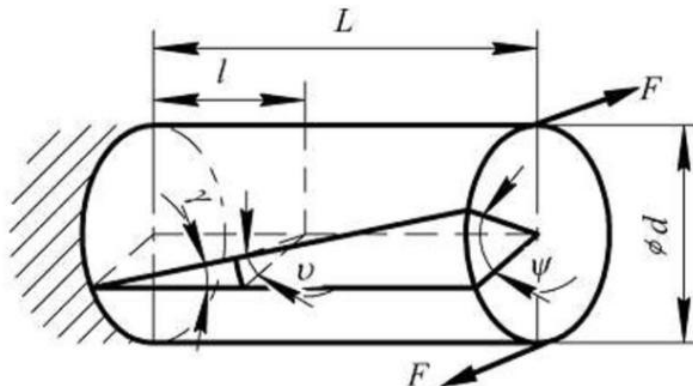
ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

4. ИСПЫТАНИЕ НА ИЗГИБ



ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

5. ИСПЫТАНИЕ НА КРУЧЕНИЕ (СКРУЧИВАНИЕ)



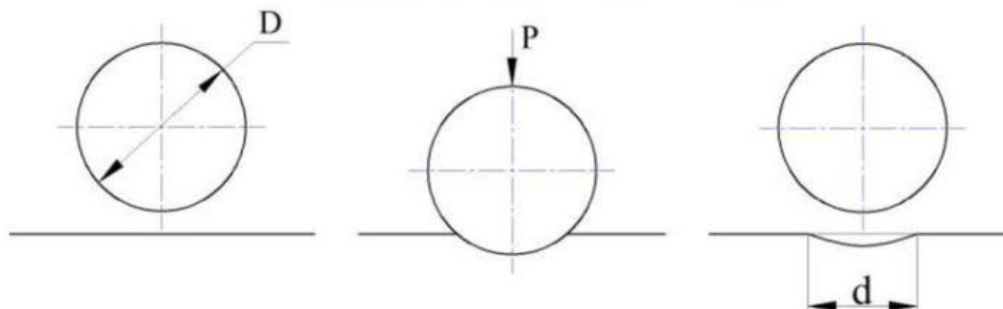
При кручении все поперечные сечения образца сдвигаются (поворачиваются) вокруг общей оси по отношению к закрепленному сечению. Этот сдвиг увеличивается с увеличением расстояния от места закрепления, причем линии, параллельные оси образца, переходят в винтовые.

ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЁРДОСТИ

Твёрдость – это свойство материала оказывать сопротивление контактной деформации или хрупкому разрушению при внедрении более твердого тела (индентора) в его поверхность.

Метод Бринелля (ГОСТ 9012–59)



$D = 1; 2; 2,5; 5$ или 10 мм

Для сталей $P = 30D^2$

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

Пример записи числа твердости по Бринеллю:

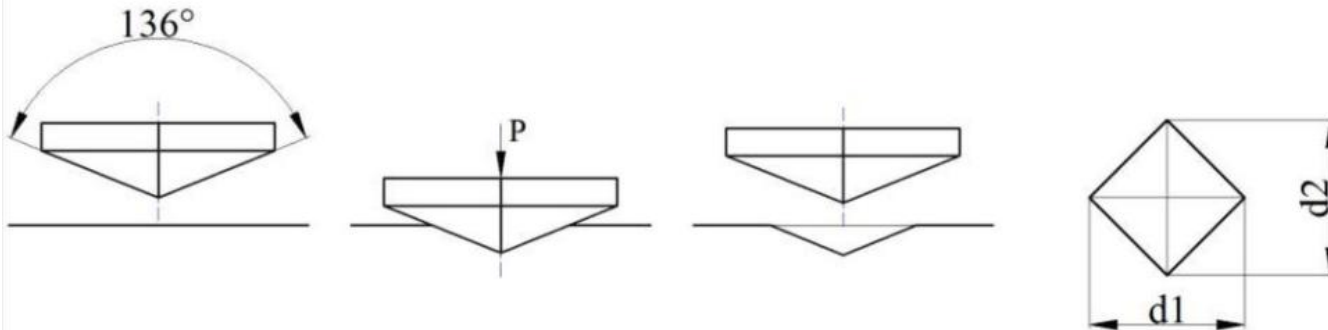
225 HB 2,5/187,5/10

Твердость, кгс/мм² Диаметр индентора, мм Нагрузка, кгс Время под нагрузкой, с

ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЁРДОСТИ

Метод Виккерса (ГОСТ 2999–75)



$P = 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30$ или 50 кГс

$$HV = \frac{P}{M} = \frac{P}{\left(\frac{d^2}{2 \sin(\alpha/2)} \right)} \approx \frac{1,8544P}{d^2}.$$

Пример записи числа твердости по Виккерсу:

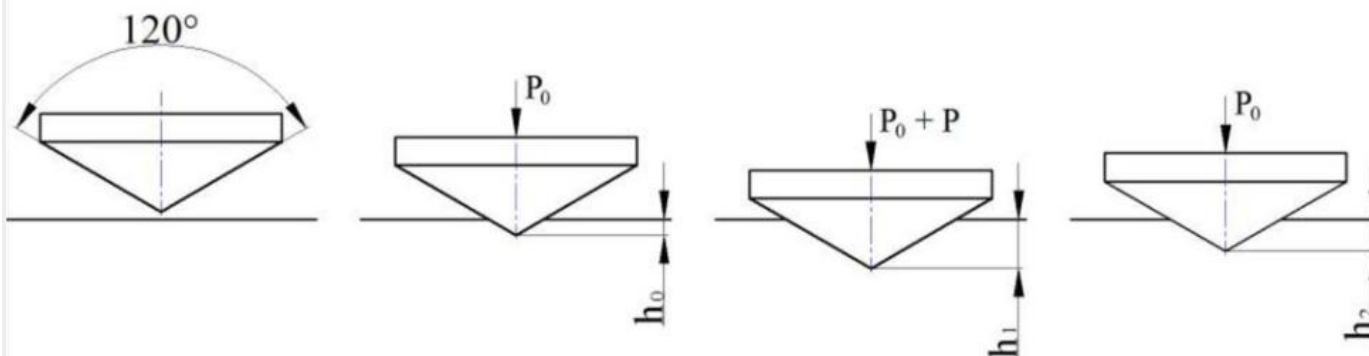
135 HV 2/10

Твердость, кГс/мм² Нагрузка, кГс Время под нагрузкой, с

ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЁРДОСТИ

Метод Роквелла (ГОСТ 9013–59)

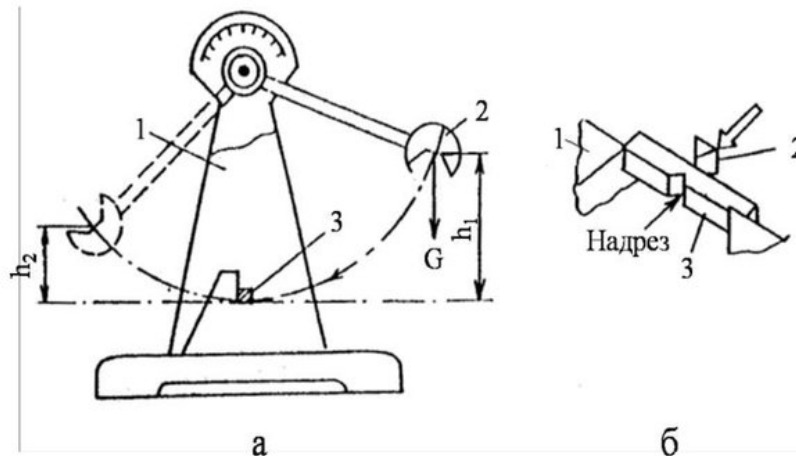


Шкала	Индентор	P_0 , кГс	P , кГс	$P_{\text{общ}}$, кГс	Формула расчета	Пример записи
A	конус	10	50	60	$HRA = 100 - (h_2 - h_1)/0,002$	61 HRA
B	шар $D = 1,588$ мм		90	100	$HRB = 130 - (h_2 - h_1)/0,002$	44 HRB
C	конус		140	150	$HRC = 100 - (h_2 - h_1)/0,002$	37 HRC

ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ

Схема испытания на ударный изгиб



а – схема маятникового копра (1 – корпус; 2 – маятник; 3 – образец); б – расположение образца

Работа K , МДж, затраченная на ударный излом образца

$$K = G (h_1 - h_2),$$

G – вес маятника; h_1, h_2 – высота подъема маятника до испытания и после него.

Ударная вязкость:

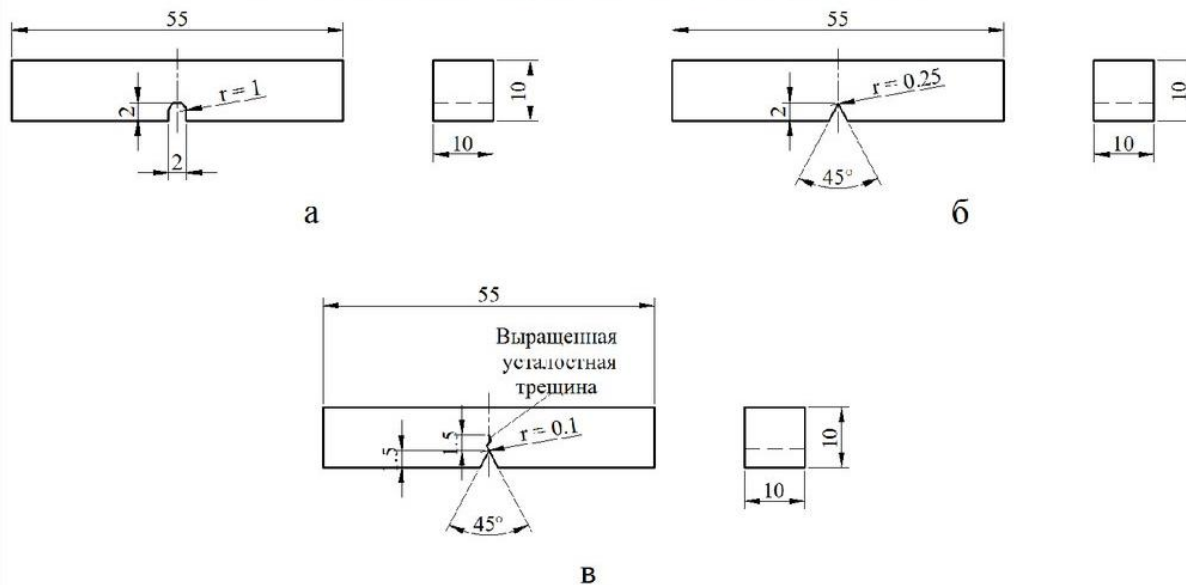
$$KCU, KCV, KCT = K/F$$

F – площадь поперечного сечения образца в надрезе

ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ

Схема образцов для испытаний на ударный изгиб



а – образец с U-образным надрезом; *б* – с V-образным надрезом; *в* – с усталостной трещиной

ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Испытание на одноосное статическое растяжение является наиболее распространённым способом механических испытаний материала.

Преимущества:

– при одноосном растяжении в образце возникает однородное напряжённое состояние. (Это значит, что во всех точках поперечного сечения рабочей части образца напряжения получаются одинаковыми и, независимо оттого, деформируется образец упруго или пластически, они вычисляются по одной и той же формуле:

$$\sigma = F/S$$

где **F** – растягивающая нагрузка, **S** – начальная площадь поперечного сечения образца);

– методика проведения испытаний на растяжение не сложна и хорошо отработана;
– конструкции образцов и захватов испытательных машин просты и технологичны.

Механические характеристики материалов, определяемые при испытании на растяжение, считают **основными**. Однако в ряде случаев необходимо проводить испытания и при других видах нагружения: сжатию, кручению, изгибе, сдвиге.

Для обеспечения сравнимости результатов механических испытаний методика их проведения и приемы обработки получаемых данных регламентируются соответствующими стандартами (ГОСТ, ИСО).

Испытания на растяжение

В процессе растяжения, реализуемого на специальных испытательных машинах, автоматически записывается диаграмма испытания в координатах сила – удлинение (рабочая, или индикаторная диаграмма).

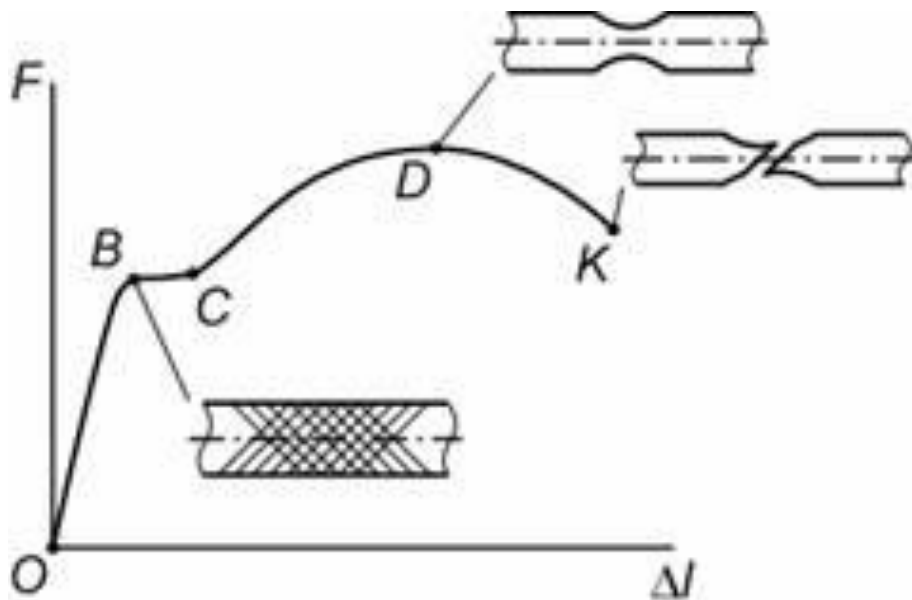


Рис. 1. Диаграмма испытания.

ОВ – участок упругости. После нагружения в пределах этого участка образец возвращается в исходное состояние. Такая деформация, полностью исчезающая после разгрузки, называется упругой.

ВС – участок общей текучести (площадка текучести). На этом участке на поверхности образца появляется сетка линий, направленных под углом приблизительно 45° к оси растяжения – линии Чернова-Людерса. Эти линии свидетельствуют о появлении нового механизма деформации, заключающегося в сдвиге атомных слоев друг относительно друга. Из-за этих сдвигов после разгрузки образец не возвращается в исходное состояние, приобретая остаточную, или пластическую, деформацию.

Испытания на растяжение

- **CD – участок упрочнения.** Пластическая деформация изменяет внутреннюю структуру материала, в результате чего образец снова проявляет сопротивление деформированию, и растягивающая сила повышается.
- **DK – участок местной текучести.** Точка D диаграммы соответствует появлению на образце локального сужения – шейки. Дальнейшая деформация локализуется в этой области, и за счет уменьшения площади поперечного сечения необходимая для растяжения сила снижается. Точка K соответствует разделению образца на части. Разрыв происходит в самом тонком месте шейки.

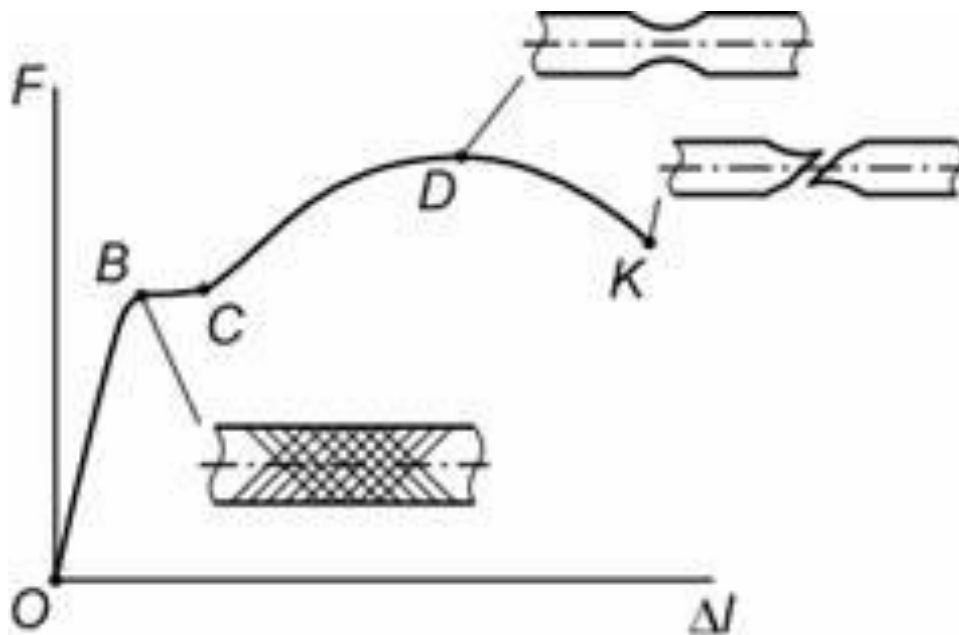
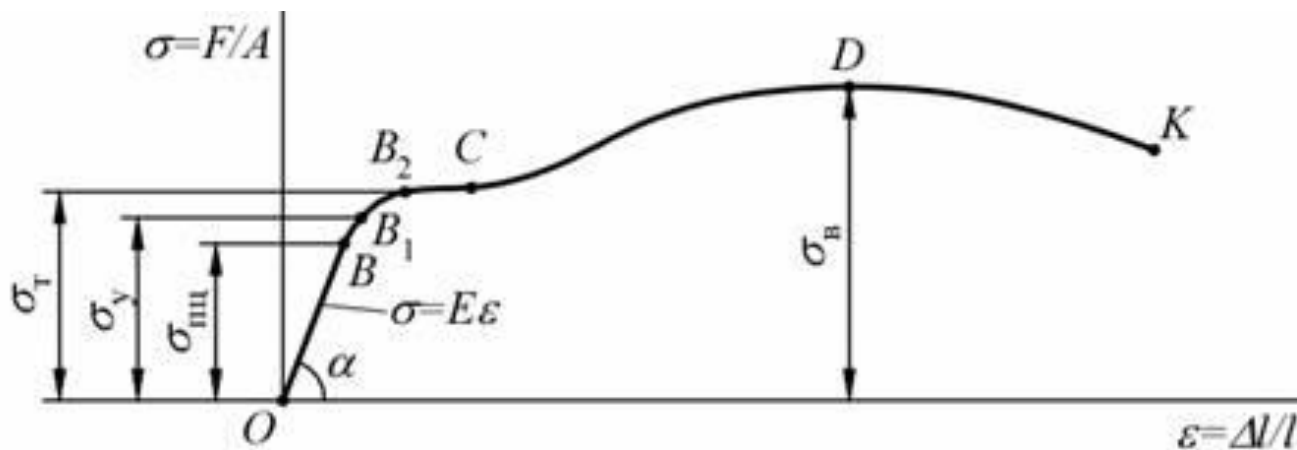


Диаграмма испытания

Условная диаграмма

- Чтобы исключить влияние геометрических размеров образца, рабочая диаграмма перестраивается в условную (в координатах напряжение – деформация).
- Полученная диаграмма называется условной потому, что при вычислении напряжения и деформации сила и удлинение относятся не к действительным, а к начальным значениям соответственно площади поперечного сечения и длины образца.

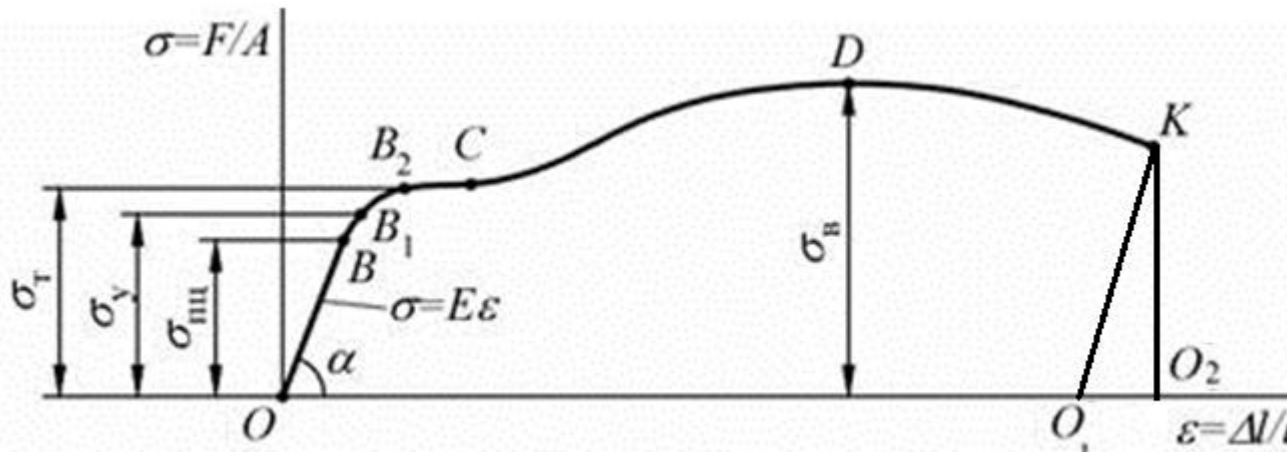


Условная диаграмма испытания

Условная диаграмма

На условной диаграмме выделяют следующие характерные точки:

- $\sigma_{\text{пц}}$ – предел пропорциональности: максимальное напряжение, до которого справедлив закон Гука (т.е. наблюдается прямая пропорциональная зависимость между напряжением и деформацией);
- σ_y – предел упругости: максимальное напряжение, до которого в материале не возникает пластических деформаций;
- σ_m – предел текучести: напряжение, при котором наблюдается рост деформации при постоянном напряжении;
- $\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности (или временное сопротивление разрыву): максимальное напряжение, которое может выдержать образец без разрушения.



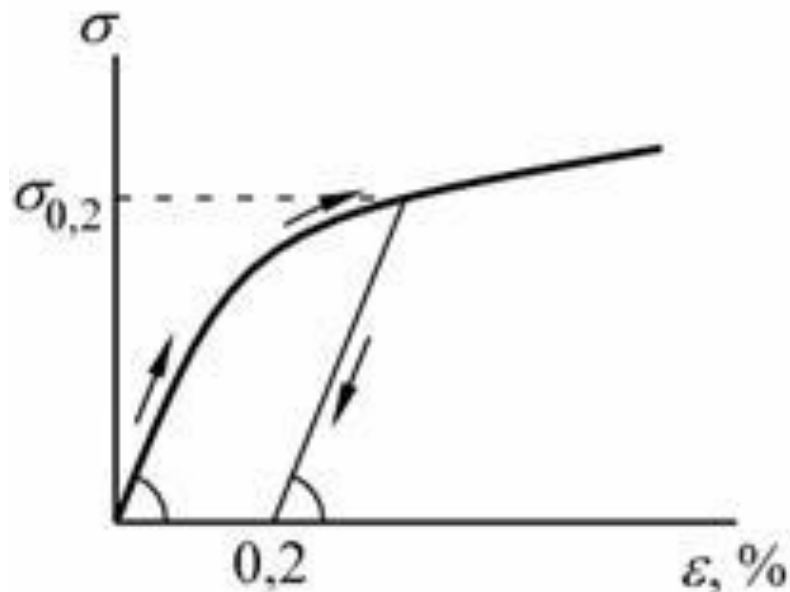
Условная диаграмма испытания

* Если прекратить нагружение в точке К и снять нагрузку, то разгрузка произойдет по закону Гука, т.е. по линии, параллельной участку упругости (отрезок $КО_1$). Таким образом, отрезок $ОО_1$ определяет величину остаточной деформации образца, а отрезок $О_1О_2$ – величину упругой деформации на момент разрыва.

Характеристики прочности

- предел текучести σ_T ;
- предел прочности σ_B .

Если диаграмма растяжения не имеет площадки текучести, то определяют условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ – напряжение, соответствующее величине остаточной деформации 0,2%.

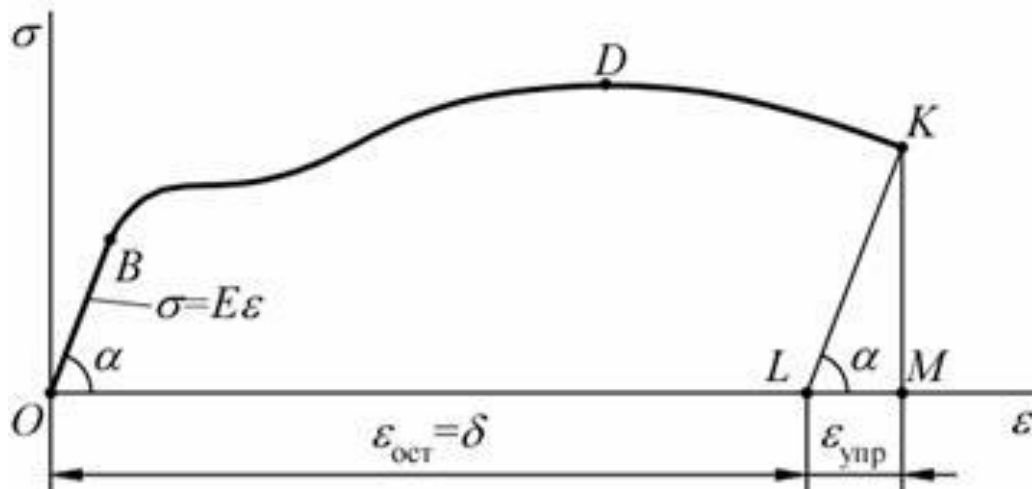


Условный предел текучести

Для некоторых материалов величину условного предела текучести определяют при остаточной деформации 0,5% ($\sigma_{0,5}$). Используется также понятие условного предела упругости $\sigma_{0,001}$ или $\sigma_{0,005}$ – напряжение, соответствующее величине остаточной деформации 0,001 или 0,005%.

Относительное остаточное удлинение при разрыве

- Относительное остаточное удлинение при разрыве можно определить непосредственно по диаграмме растяжения, проведя из точки разрыва линию, параллельную участку упругости, до пересечения с осью абсцисс (отрезок OL):



Относительное остаточное удлинение
при разрыве

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

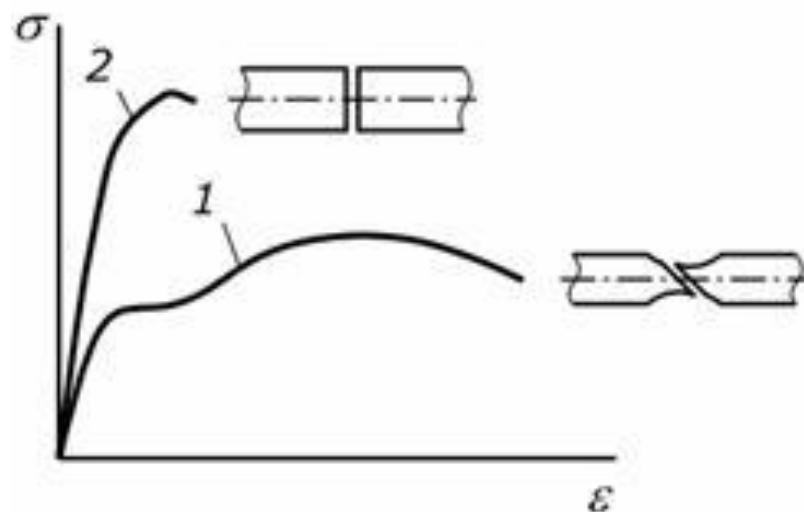
где l_0 – начальная длина образца (до испытания), l_k – конечная длина образца (после разрушения).

Пластичные и хрупкие материалы

По величине относительного остаточного удлинения при разрыве принято различать:

- *пластичные материалы* – способные получать без разрушения большие остаточные деформации ($\delta > 10\%$);
- *хрупкие материалы* – способные разрушаться без образования заметных остаточных деформаций ($\delta < 5\%$).

Пластичные и хрупкие материалы отличаются также по характеру разрушения. Пластичные материалы перед разрывом образуют заметную шейку, а разрушение происходит под углом примерно 45° к оси растяжения (последнее хорошо видно на плоских образцах). Хрупкие материалы разрушаются по плоскости, нормальной оси растяжения, практически без образования шейки.



Пластичный (1) и хрупкий (2) материалы при растяжении

Необходимо построить кривую пластического течения (диаграмму растяжения), лучше использовать ПО “Origin”, в ТПУ есть доступ.

По осям необходимо выбрать масштаб, оси можно обозначить символами «?» и «?» с указанием единиц измерения «МПа» и «%» или словами «напряжение течения» и «Деформация», также указав единицы измерения. Поле рисунка должно иметь размеры примерно равные половине листа А4. Затем требуется определить механические характеристики, это предел текучести, предел прочности, удлинение до разрушения (максимальная деформация до разрушения), величину упругой деформации и модуль упругости. Необходимо дать описание полученных результатов и диаграммы растяжения.

На следующей странице приведена схема диаграммы и показано, как определить характеристики. Далее приведены материалы Вам в помощь. Прошу ознакомиться с этим материалом.

Экспериментальная установка

Instron VHS 40/50-20

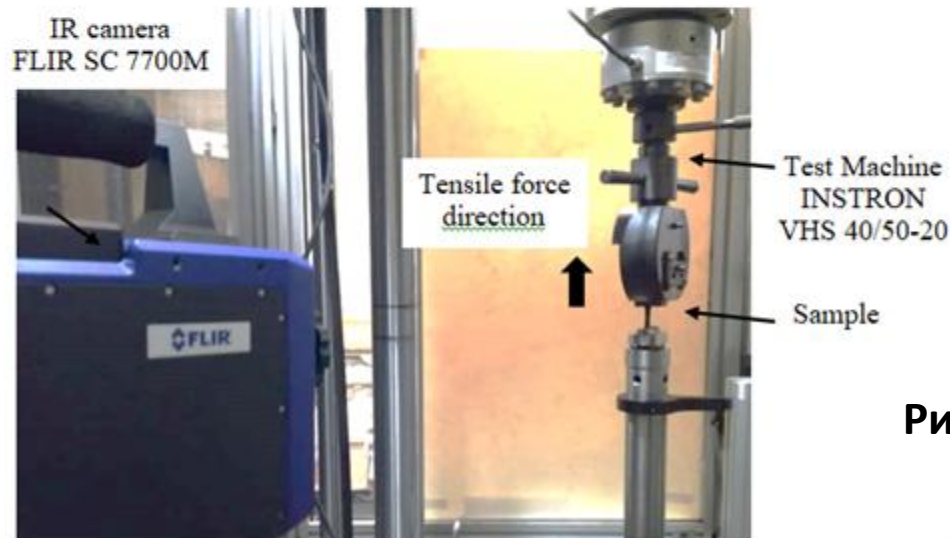
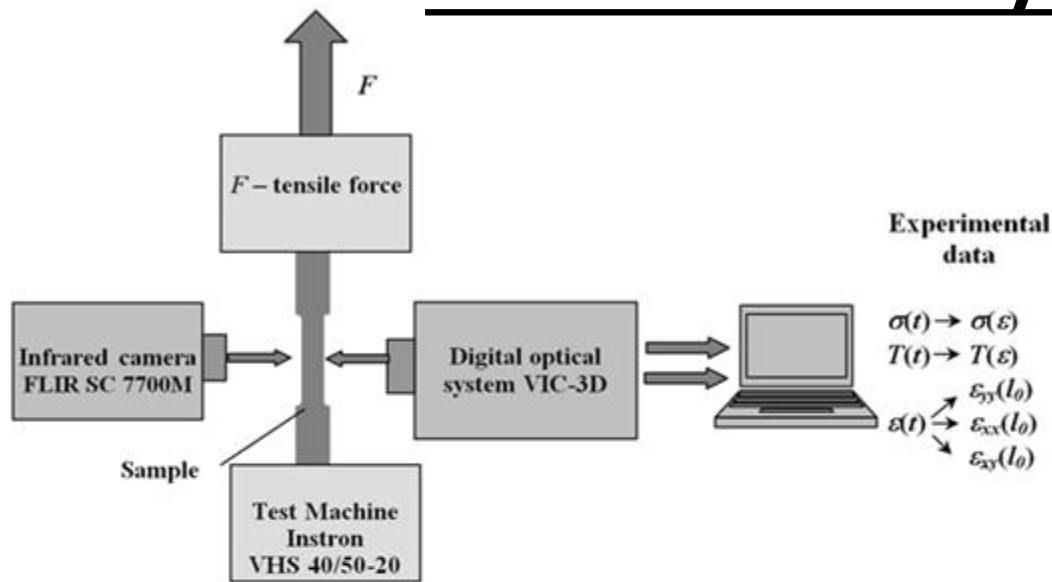


Рис. 6. Общий вид установки.

Форма и размеры образцов

Для проведения экспериментов были подготовлены **плоские** образцы из сплава Zr-1%Nb. Их размеры приведены в приложенном файле «Размеры образцов Zr-1Nb.doc» и на слайде №7.

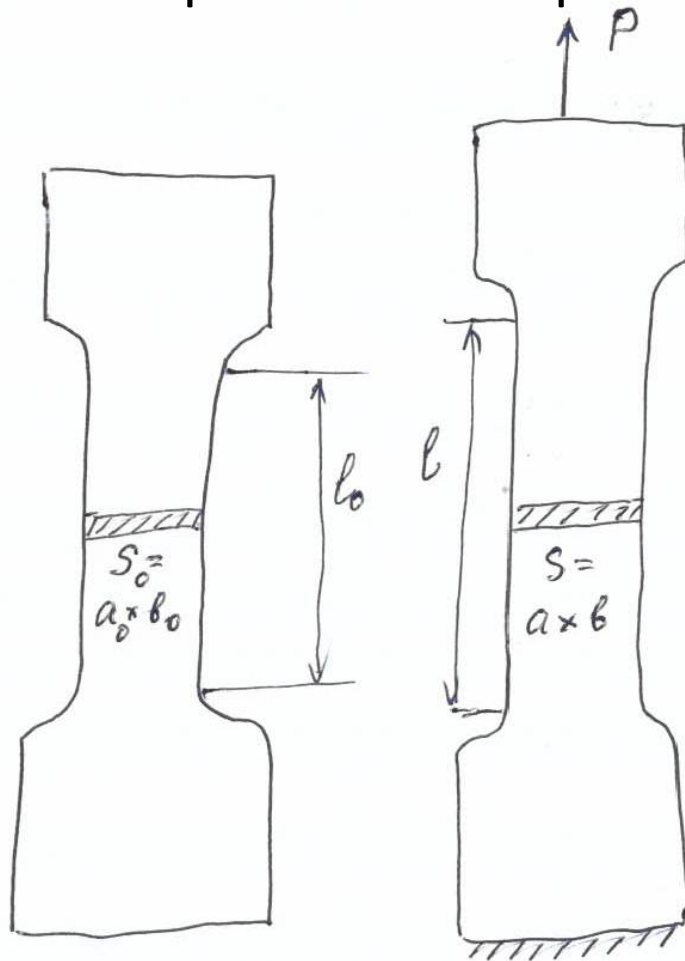


Рис. 7. Общий вид образцов на растяжение.

Микроструктура сплава Zr – 1 мас. % Nb

С помощью термического отжига в диапазоне температур 400-600 °С были подготовлены образцы с различным размером зёрен (от 0,2 до 2 мкм). Параметры обработки представлены в файле «Размеры образцов Zr-1Nb.doc» и на слайде №7. (см. столбец «Структурное состояние»). Ниже приведены изображения их структуры.

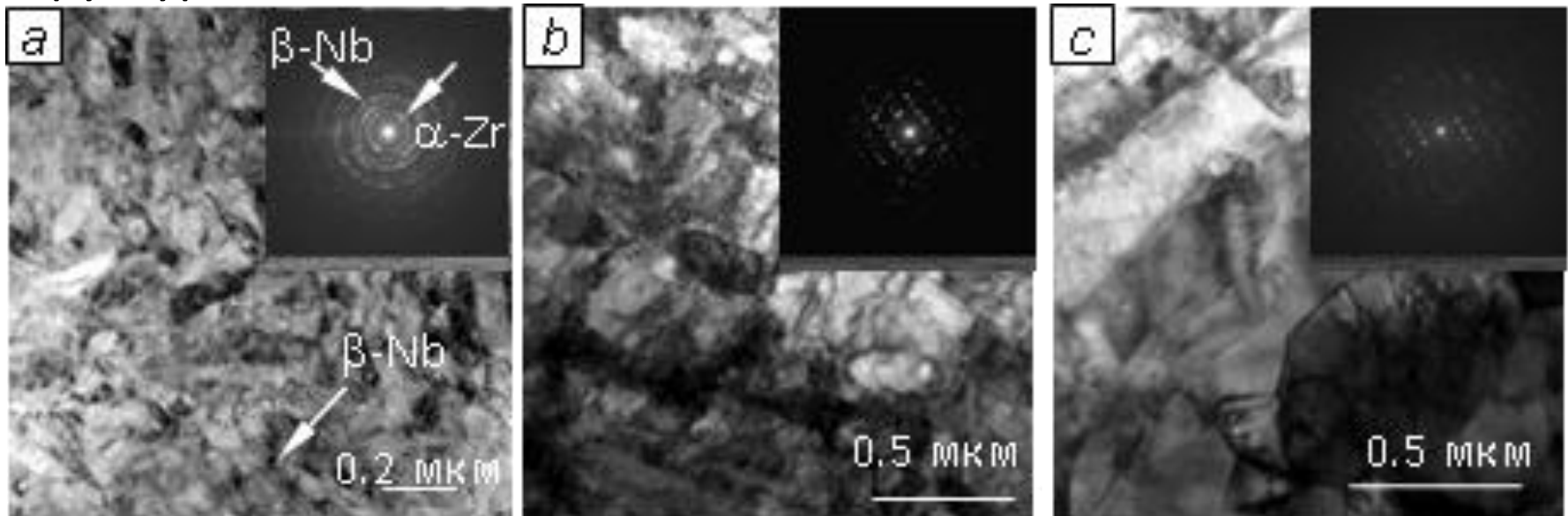


Рис. 8. Электронно-микроскопические светлопольные с соответствующими микродифракциями изображения сплава Zr - 1 мас. % Nb в УМЗ состоянии и после отжигов, °С: *a* – УМЗ; *b* – 400; *c* – 450; стрелками показаны рефлексы от идентифицированных фаз и сами фазы.

Образцы сплава после механических испытаний на растяжение



Рис. 9. Фотографии образцов после испытаний.

Исходные параметры образцов

Таблица 1 – Данные образцов и их предварительной обработки.

Номер образца	Ширина, a_0 , мм	Толщина, b_0 , мм	Длина рабочей части, l_0 , мм	Структурное состояние
1	8,05	0,89	30	УМЗ, Размер зерна – 0,2 мкм
2	8,04	0,76	30	
3	8,02	0,82	30	
4	7,97	0,87	30	
5	7,87	0,9	30	
6	7,96	0,71	30	
7	8,06	0,73	30	
8	7,94	0,84	30	
9	7,97	0,81	30	УМЗ+отжиг 400С, Размер зерна – 0,3 мкм
10	7,99	0,84	30	
11	8,07	0,87	30	
12	8,02	0,83	30	
13	7,85	0,92	30	УМЗ+отжиг 450С, Размер зерна – 0,7 мкм
14	7,86	0,96	30	
15	7,96	0,85	30	
16	7,98	0,68	30	
17	8,02	0,87	30	УМЗ+отжиг 500С, Размер зерна – 1,2 мкм
18	8,02	0,92	30	
19	8,08	0,9	30	
20	8,09	0,91	30	
21	7,95	0,81	30	УМЗ+отжиг 600С, Размер зерна – 2 мкм
22	8,0	0,82	30	
23	8,02	0,83	30	
24	8,0	0,82	30	
25	7,93	0,81	30	
26	8,01	0,82	30	
27	8,04	0,83	30	
28	8,06	0,83	30	

Результаты испытаний

В таблице Excel приведены следующие данные:

- в столбце 1 – время (сек);
- в столбце 2 - расстояние (мм);
- в столбце 3 – нагрузка (кН).

	A	B	C	D	E	F
1	Time Sec,"Position mm", "Load kN", "Cycle"					
2	0.,-44.3368,-0.262344,1					
3	0.002,-44.3213,-0.252455,1					
4	0.004,-44.307,-0.246996,1					
5	0.006,-44.3253,-0.250494,1					
6	0.008,-44.3548,-0.246042,1					
7	0.01,-44.3211,-0.247917,1					
8	0.012,-44.3,-0.259101,1					
9	0.014,-44.3348,-0.262073,1					
10	0.016,-44.3628,-0.263467,1					
11	0.018,-44.3325,-0.258783,1					
12	0.02,-44.3174,-0.262329,1					

Рис. 10. Результаты испытаний.

ПО для графической обработки результатов испытаний Origin 8.0

Доступ к программе через сайт var.tpu.ru (логин и пароль от личного кабинета на сайте ТПУ) или на своём персональном компьютере.

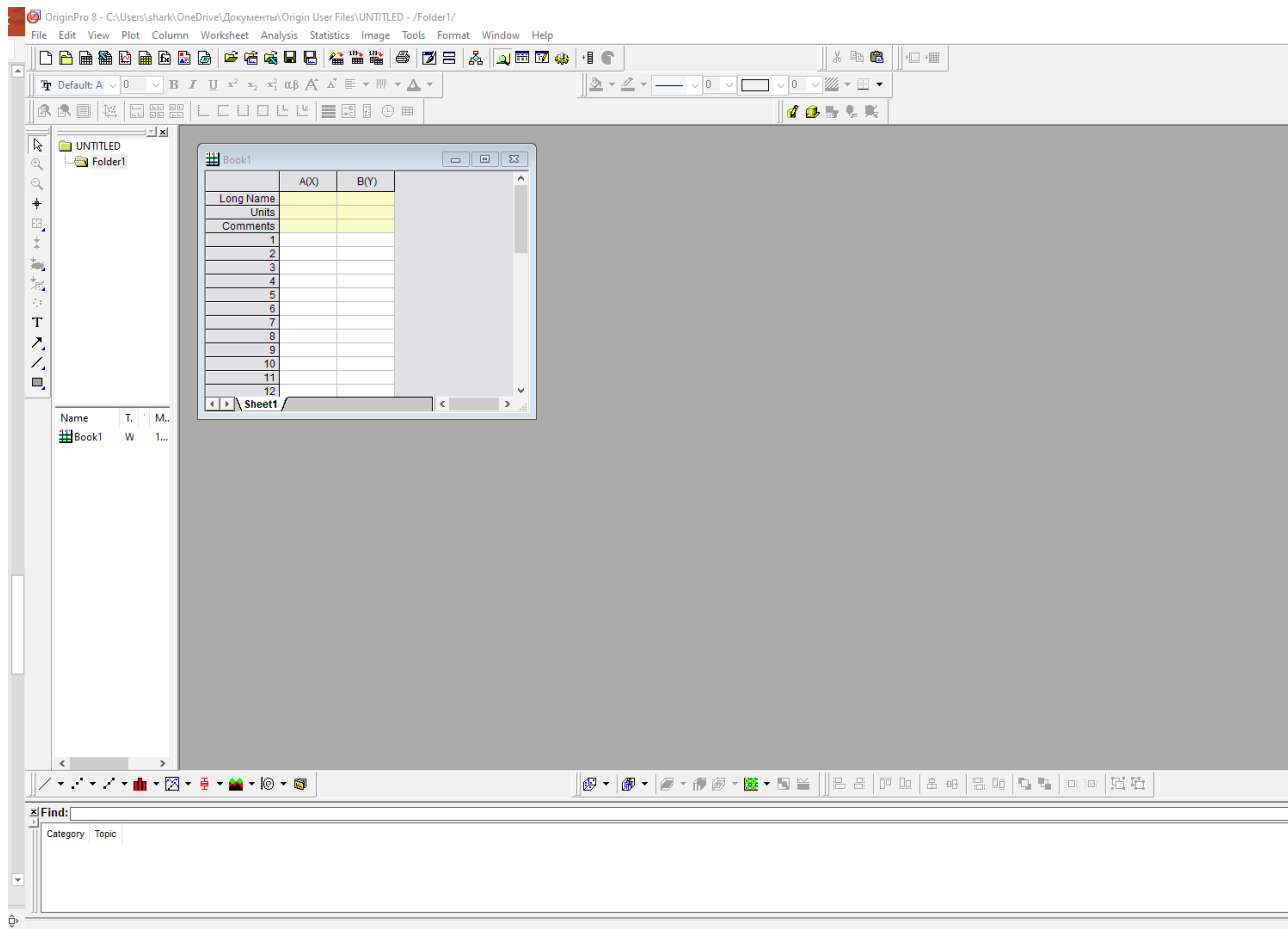


Рис. 11. Рабочее окно программы.

Порядок расчета кривой нагружения

Для расчёта использовать Excel и Origin. Порядок следующий.

1. Перенести данные из Excel в Origin: File / Import / Comma Delimited (csv).

2. Построить График «Нагрузка от времени»:

- на графике найти значение «мертвого времени» t_0^* ;

- в колонке «Load» найти значение соответствующее t_0 ;

- вырезать массивы исходных данных выше значения t_0 ;

- вычесть из Время значение t_0 (т.е. время эксперимента должно начинаться с нуля).

3. Рассчитать Δl : к колонке «Position» прибавить «нулевое» значение в колонке «Position».

4. Рассчитать деформацию: $\varepsilon = \Delta l / l_0$.

5. Рассчитать напряжение:

$$\sigma = F / S_0, \quad (2)$$

где F – нагрузка (Н), $S_0 = a_0 \times b_0$ [мм²], a_0 – ширина образца, b_0 – толщина образца.

a_0 , b_0 и l_0 – размеры образца до растяжения, приведены в таблицы 1 на слайде 31.

* **«Мертвое время»** – время до начала изменения удлинения образца (т.е. до устранения возможных люфтов при закреплении образца в захватах).

Работа с Origin

The screenshot displays the OriginPro 8.0 software interface. The main window shows a data table with the following columns: A(X), B(Y), C(Y), and D(Y). The table contains 41 rows of data, starting with a header row and followed by 40 rows of numerical data. The left sidebar shows a project tree with 'UNTITLED' and 'Folder1'. The bottom status bar shows '01_E110'.

	A(X)	B(Y)	C(Y)	D(Y)
Long Name				
Units				
Comments				
1 Time Sec	Position mm	Load kN	Cycle	
2 0	-44.3368	-0.26234	1	
3 0.002	-44.3213	-0.25245	1	
4 0.004	-44.307	-0.247	1	
5 0.006	-44.3253	-0.25049	1	
6 0.008	-44.3548	-0.24604	1	
7 0.01	-44.3211	-0.24792	1	
8 0.012	-44.3	-0.2591	1	
9 0.014	-44.3348	-0.26207	1	
10 0.016	-44.3628	-0.26347	1	
11 0.018	-44.3325	-0.25878	1	
12 0.02	-44.3174	-0.26233	1	
13 0.022	-44.2851	-0.26203	1	
14 0.024	-44.3368	-0.27933	1	
15 0.026	-44.3647	-0.29382	1	
16 0.028	-44.3394	-0.28124	1	
17 0.03	-44.3678	-0.29276	1	
18 0.032	-44.3174	-0.28143	1	
19 0.034	-44.3282	-0.2808	1	
20 0.036	-44.3746	-0.27448	1	
21 0.038	-44.3481	-0.25933	1	
22 0.04	-44.3079	-0.25341	1	
23 0.042	-44.31	-0.25971	1	
24 0.044	-44.3534	-0.26356	1	
25 0.046	-44.3197	-0.27244	1	
26 0.048	-44.3478	-0.26124	1	
27 0.05	-44.3176	-0.26674	1	
28 0.052	-44.382	-0.26403	1	
29 0.054	-44.3479	-0.27021	1	
30 0.056	-44.3505	-0.2562	1	
31 0.058	-44.3595	-0.2565	1	
32 0.06	-44.3532	-0.25665	1	
33 0.062	-44.3277	-0.24982	1	
34 0.064	-44.3083	-0.24683	1	
35 0.066	-44.338	-0.26501	1	
36 0.068	-44.3601	-0.26177	1	
37 0.07	-44.3519	-0.26475	1	
38 0.072	-44.3345	-0.26656	1	
39 0.074	-44.3469	-0.25994	1	
40 0.076	-44.3572	-0.2598	1	
41 0.078	-44.347	-0.25109	1	

Рис. 12. Рабочее окно программы с импортированными данными.

Формулы для расчета напряжения и удлинения

Условное напряжение σ определяется, используя соотношение:

$$\sigma = \frac{F}{S_0},$$

где F – нагрузка, приложенная к образцу, S_0 – поперечное сечение рабочей части образца, $S_0 = a_0 \times b_0$, a_0 – ширина образца, b_0 – толщина образца.

Условная деформация определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%,$$

где $\Delta l = l - l_0$ – удлинение рабочей части образца, l_0 – начальная длина рабочей части образца, l – длина рабочей части образца в момент испытания.

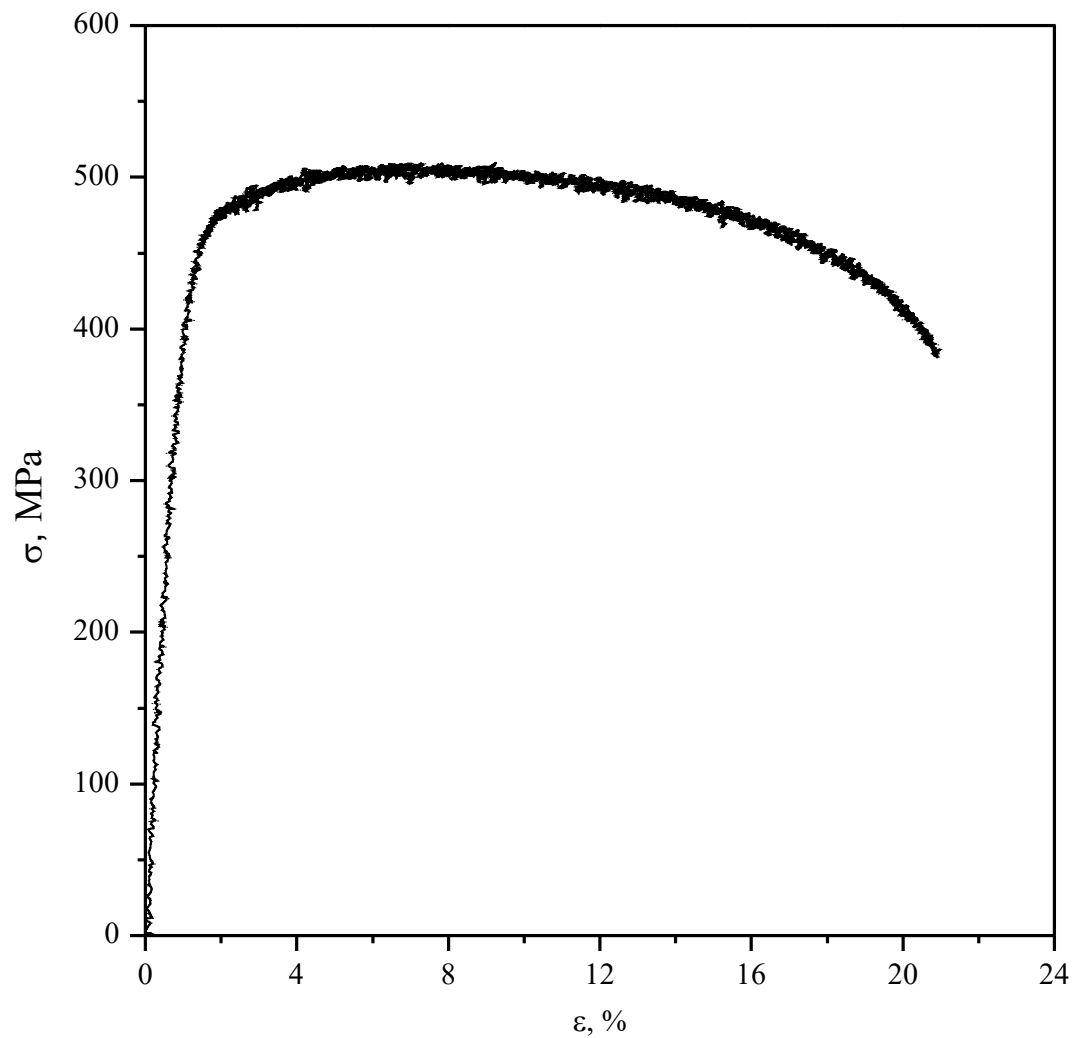


Рисунок. Диаграмма растяжения сплава Zr - 1 мас. % Nb, далее указываем состояние, как в таблице.