

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра металловедения цветных металлов

В.С. Золоторевский

В.К. Портной

А.Н. Солонин

А.С. Просвиряков

## **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ**

Лабораторный практикум

Часть I

Статические испытания

Допущено учебно-методическим объединением  
по образованию в области металлургии в качестве  
учебного пособия для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению Металлургия

Москва 2013

Рецензент

д-р техн. наук, проф. *Н.И. Колобнев*

**Механические свойства металлов:** лаб. практикум / В.С. Золоторевский, В.К. Портной, А.Н. Солонин, А.С. Просвиряков. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2013. – 110 с.

Практикум содержит 6 лабораторных работ, связанных с основными механическими испытаниями на растяжение, сжатие, изгиб, твердость, микротвердость, ползучесть и длительную прочность. Лабораторные работы направлены на привитие практических навыков проведения этих испытаний и анализа полученных результатов.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
Лабораторная работа 1. Статические испытания на растяжение, сжатие, изгиб и анализ диаграмм деформации .....	5
Лабораторная работа 2. Расчет диаграмм истинных напряжений по первичным кривым растяжения.....	33
Лабораторная работа 3. Измерение твердости.....	38
Лабораторная работа 4. Измерение микротвердости .....	56
Лабораторная работа 5. Испытания на длительную прочность и замедленное разрушение .....	67
Лабораторная работа 6. Испытания на ползучесть и определение вклада внутризеренной и межзеренной деформации в общее удлинение при ползучести.....	80
Приложение 1. Таблица перевода чисел твердости .....	97
Приложение 2. Числа твердости по Бринеллю .....	99
Приложение 3. Числа твердости по Виккерсу. Нагрузка 10 кгс .....	103
Приложение 4. Минимальная толщина образцов для разных чисел твердости .....	108
Приложение 5. Числа микротвердости при испытании вдавливанием четырехгранной алмазной пирамиды при нагрузке 50 гс.....	109

## **ВВЕДЕНИЕ**

Настоящий лабораторный практикум предназначен для студентов, обучающихся по направлению «Металлургия». В результате выполнения лабораторных работ студенты получают практические навыки проведения важнейших механических испытаний и учатся анализировать результаты этих испытаний.

Изменения и дополнения, внесенные в настоящее издание практикума, связаны, главным образом, с заменой испытательного оборудования на более современное.

Во всех лабораторных работах студенты выполняют индивидуальные задания, защита работ также проводится индивидуально.

## Лабораторная работа 1

# СТАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ, СЖАТИЕ, ИЗГИБ И АНАЛИЗ ДИАГРАММ ДЕФОРМАЦИИ

(3 часа)

### 1. Цели работы

Знакомство с методикой проведения различных видов статических механических испытаний. Сравнительная оценка свойств сплавов по результатам испытаний на растяжение, сжатие и изгиб. Приобретение навыков расчета механических свойств по диаграммам деформации.

### 2. Теоретическая часть

Разные виды механических испытаний, в зависимости от напряженного состояния в рабочей части образца, характеризуются различным коэффициентом «мягкости» ( $\alpha$ ). По Я.Б. Фридману:

$$\alpha = \frac{t_{\max}}{S_{\max}^n}, \quad (1.1)$$

где  $t_{\max} = \frac{(S_1 - S_3)}{2}$  – истинное максимальное касательное напряжение;

$S_{\max}^n = S_1 - \nu(S_2 + S_3)$  – наибольшее приведенное главное нормальное напряжение;

$S_1$ ,  $S_3$  и  $S_2$  – наибольшее, наименьшее и среднее главные нормальные истинные напряжения;

$\nu$  – коэффициент Пуассона. Этот коэффициент при одноосном растяжении характеризует отношение поперечной относительной деформации к продольной. Если исходный радиус образца  $r_0$ , а длина  $l_0$ , то после некоторой деформации они изменятся, соответственно, до  $r_1 < r_0$

и  $l_1 > l_0$ . Тогда:  $\nu = \frac{(r_0 - r_1)/r_0}{(l_1 - l_0)/l_0} = \frac{\Delta r/r_0}{\Delta l/l_0}$ .

Для металлов коэффициент Пуассона  $\nu \approx 0,25$ , поэтому:

$$\alpha = \frac{(S_1 - S_3)}{2S_1 - 0,5(S_2 + S_3)}. \quad (1.2)$$

Величина  $\alpha$ , как видно из формул (1.1) и (1.2), зависит от соотношения касательных и нормальных, а также растягивающих и сжимающих напряжений в схеме напряженного состояния. Чем больше относительный вклад касательных и сжимающих напряжений по сравнению, соответственно, с нормальными и растягивающими, тем больше способность данного материала пластически деформироваться. Иными словами, один и тот же материал при испытании, характеризующемся большим  $\alpha$ , должен проявить большую пластичность.

По формуле (1.2) легко рассчитать коэффициенты мягкости для одноосного растяжения и сжатия. Они будут равны, соответственно, 0,5 и 2. Статическое испытание на изгиб характеризуется промежуточным значением  $\alpha$ .

При механических испытаниях образец подвергается вначале упругой, затем пластической деформации. Стадия упругой деформации имеет место при всех без исключения видах механических испытаний. Согласно известному закону Гука, на этой стадии соблюдается прямая пропорциональность между приложенным к образцу напряжением и величиной его упругой деформации.

На рис. 1.1 показаны начальные (упругие) участки кривых напряжение – деформация при одноосном растяжении для двух разных металлов. Наклон каждой прямой, т.е коэффициент пропорциональности, связывающий напряжение и деформацию при растяжении, характеризует модуль нормальной упругости (модуль Юнга):

$$E = \frac{S}{e} . \quad (1.3)$$

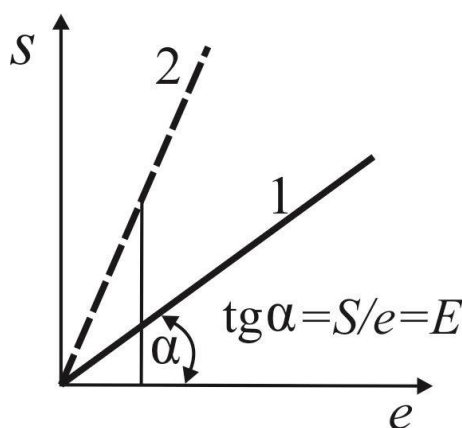


Рис. 1.1. Упругие участки кривых напряжение – деформация при одноосном растяжении

Модуль упругости определяет жесткость материала, т.е. интенсивность увеличения напряжения по мере упругой деформации. Соответственно, чем больше угол  $\alpha$  прямого участка, тем выше модуль (рис. 1.1,  $E_2 > E_1$ ).

## 2.1 Испытания на растяжение

Испытания на одноосное растяжение – наиболее широко используемый вид испытания для оценки механических свойств металлов и сплавов. Одноосное растяжение сравнительно легко подвергается анализу, позволяет в одном опыте определить сразу несколько важных механических характеристик материала, являющихся критерием его качества и нужных для конструкторских расчетов.

Для проведения испытания на растяжение необходимо иметь образец и испытательную машину, которая объединяет механизмы, нагружающие образец и измеряющие величину прикладываемых нагрузок.

Образец должен иметь такую форму, чтобы в пределах определенной части его объема во время испытания создавалось линейное напряженное состояние растяжения. Это – рабочая часть образца, обычно представляющая собой цилиндрический или прямоугольный стержень. Производящие растяжение силы должны давать две равнодействующие, приложенные в центре тяжести сечения образца и направленные строго по его оси.

Осуществление линейного растяжения рабочей части образца позволяет пользоваться простейшими формулами для расчета нормальных и касательных напряжений. Условное нормальное напряжение в поперечном сечении образца определяется по формуле  $\sigma = P/F_0$ , где  $P$  – растягивающее образец усилие, а  $F_0$  – площадь начального поперечного сечения образца. Условное наибольшее касательное напряжение  $\tau_{\max} = \sigma/2$ . Действительное напряжение  $S = P/F$ , где  $F$  – площадь наименьшего из сечений по длине образца, находящегося под нагрузкой  $P$ . Действительное напряжение  $S$  при испытании на растяжение, как правило, больше условного напряжения  $\sigma$  из-за постепенного уменьшения во время испытания величины сечения образца  $F$  ( $F_0 > F$ ).

Для испытаний на растяжение используют образцы с круглым или прямоугольным сечением. На рис. 1.2 показаны примеры стандартизированной формы круглых и плоских (с прямоугольным сечением) образцов (ГОСТ 1497-84). Кроме рабочей части, образцы чаще всего имеют головки той или иной конфигурации. Форма и размеры головки и переходной части между ней и рабочей частью должны подбираться в зависимости от конструкции захватов испытательной машины таким образом, чтобы перекос образца при растяжении был минимальным.

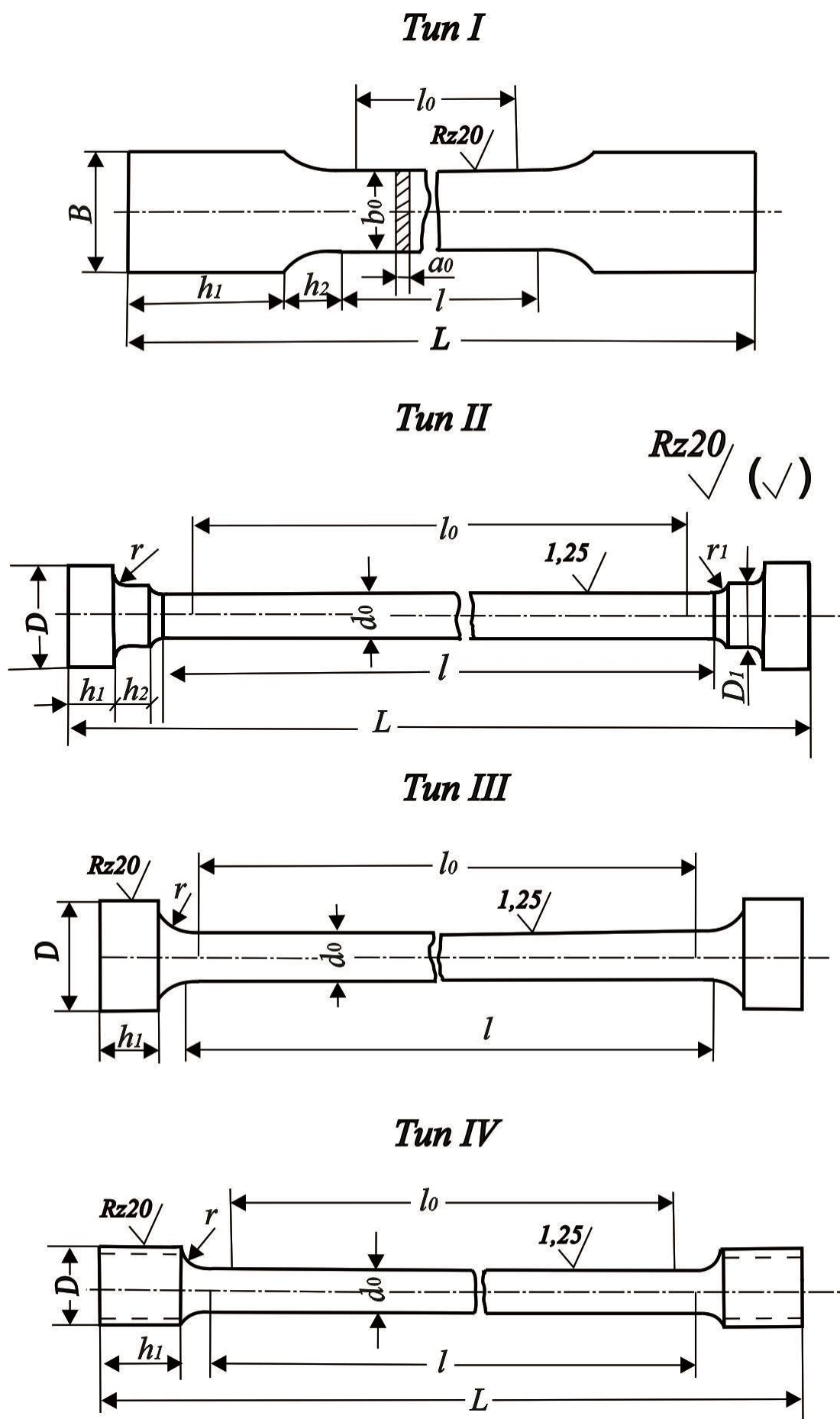


Рис. 1.2. Стандартные образцы для испытаний на растяжение (ГОСТ 1497-84)



На рабочей длине образца  $l$  наносится расчетная длина  $l_0$ . По увеличению этой длины при испытании определяют удлинение образца. При испытаниях на растяжение применяют образцы с начальной расчетной длиной  $l_0 = 5,65\sqrt{F_0}$  или  $l_0 = 11,3\sqrt{F_0}$ , диаметром 3 мм и более или толщиной 0,5 мм и более. Образцы с расчетной длиной  $l_0 = 5,65\sqrt{F_0}$  называются короткими или пятикратными (у них  $l_0 = 5d_0$ ), а с расчетной длиной  $l_0 = 11,3\sqrt{F_0}$  – длинными или десятикратными ( $l_0 = 10d_0$ ). Рабочая длина цилиндрических образцов должна быть не меньше  $l = l_0 + d_0$ , а плоских – не меньше  $l = l_0 + b_0/2$ , где  $b_0$  – исходная ширина образца.

В качестве основных (или нормальных) образцов с цилиндрической рабочей частью применяют образцы с диаметром  $d_0 = 10$  мм и начальной расчетной длиной  $l_0 = 100$  мм (длинные) и  $l_0 = 50$  мм (короткие). Образцы всех других размеров называют пропорциональными. Наиболее широко используют «гагаринские» образцы (рис. 1.2, тип III) с диаметром на рабочей длине  $d_0 = 6$  мм и расчетной длиной  $d_0 = 30$  мм. Из плоских чаще всего используют вырезанные из листа образцы с конфигурацией типа I на рис. 1.2 с толщиной 1-2 мм и расчетной длиной  $l_0 = 50 \div 70$  мм.

Основным результатом испытания на растяжение является первичная диаграмма растяжения в координатах «нагрузка  $P$  (сопротивление деформации) – абсолютная деформация (удлинение  $\Delta l$ )». Диаграмма растяжения в целом наиболее полно описывает поведение материала образца в процессе испытания, начиная с упругой деформации и кончая разрушением. По диаграмме растяжения рассчитывают все основные характеристики сопротивления деформации и разрушению: пределы пропорциональности, упругости и текучести, временное сопротивление (условный предел прочности), истинное сопротивление разрыву, степень деформационного упрочнения, работу деформации образца и другие. С помощью диаграммы растяжения оценивают также некоторые характеристики пластичности.

Вид первичных диаграмм растяжения различен у разных материалов. На рис. 1.3 схематично показаны три основных типа диаграмм растяжения поликристаллов. Диаграмма на рис. 1.3а характерна для материалов, разрушающихся хрупко, без заметной пластической деформации, на рис. 1.3б – для материалов, равномерно деформирующихся вплоть до разрушения и на рис. 1.3в, когда после равномерной начинается сосредоточенная пластическая деформация в образующейся шейке, где происходит разрушение. Возрастание нагрузки до момента разрушения (рис. 1.3б) или до максимума (рис. 1.3в) может быть либо плавным (сплошные линии на рис. 1.3), либо прерывистым. В последнем случае на диаграмме может, в частности, появиться зуб и площадка текучести (пунктир на рис. 1.3б, в).

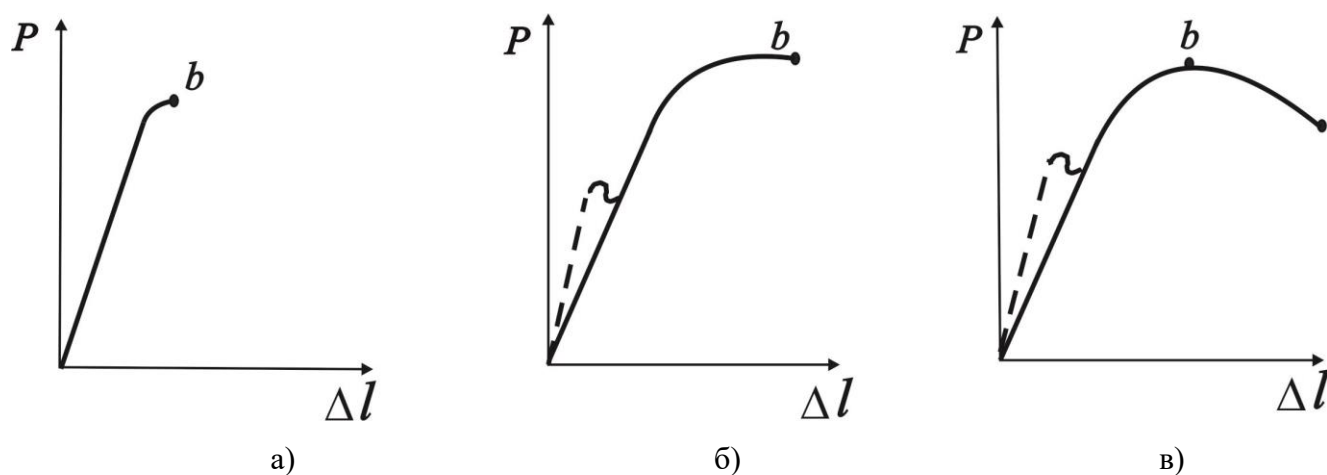


Рис. 1.3. Разновидности первичных диаграмм растяжения

Рассмотрим методику расчета характеристик свойств на примере диаграмм растяжения, подобных показанным на рис. 1.3в. На рис. 1.4 отмечены точки, по ординатам которых рассчитывают отдельные механические свойства, характеризующие сопротивление образца деформации и разрушению.

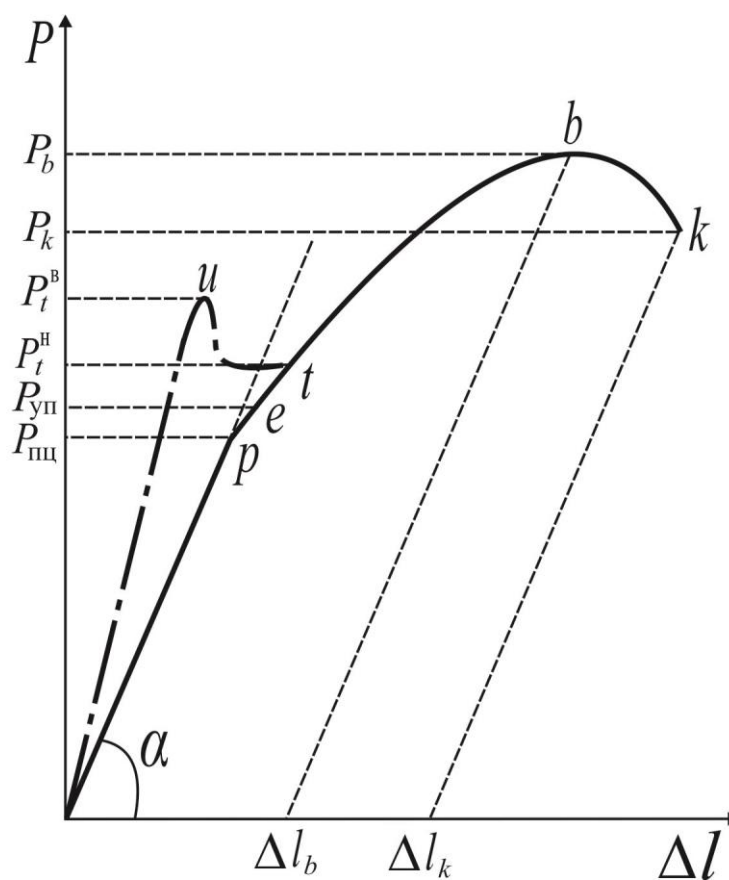


Рис. 1.4. Характерные точки на диаграмме растяжения, по которым рассчитываются механические свойства

По величине силы  $P_{\text{пц}}$  (точка «р») определяют предел пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{пц}}}{F_0}$ , где

$F_0$  – площадь первоначального сечения расчетной части образца. Предел пропорциональности характеризует то напряжение, до которого соблюдается закон пропорциональности между нагрузкой и деформацией. Поэтому приближенно положение точки  $P_{\text{пц}}$  можно определить, продолжив прямолинейный участок диаграммы (рис. 1.4). Точка «р» соответствует началу расхождения кривой растяжения и этого продолжения.

Более строго предел пропорциональности определяют как наименьшее условное напряжение, при котором отклонение от закона пропорциональности достигает заданной величины. Допуск на отклонение от закона пропорциональности при графическом определении  $\sigma_{\text{пц}}$  по диаграмме растяжения обычно задается по изменению  $\text{tg}\alpha$  (рис. 1.4): за предел пропорциональности принимают напряжение в точке, где касательная к диаграмме растяжения образует с осью деформаций угол, тангенс которого в 1,5 раза меньше  $\text{tg}\alpha$ .

Для приближенного графического расчета  $\text{tg}\alpha$  можно использовать два способа (рис. 1.5). В первую очередь продолжают прямолинейный участок диаграммы до пересечения с осью деформаций в точке «О», которую и принимают за новое начало координат, исключая таким образом искаженный за счет самоцентрирования образца в захватах машины начальный участок диаграммы. Далее при использовании первого метода на произвольной высоте в пределах упругой области проводят прямую  $AB$  (рис. 1.5а), откладывают вдоль нее отрезок  $BC = AB/2$  и проводят линию  $OC$ . При этом  $\text{tg}\alpha_1 = \frac{\text{tg}\alpha}{1,5}$ . Если теперь провести касательную к кривой растяжения параллельно  $OC$ , то точка касания «Р» определит искомую нагрузку  $P_{\text{пц}}$  (рис. 1.5а).

Во втором способе из произвольной точки прямолинейного участка диаграммы опускают перпендикуляр  $KU$  (рис. 1.5б) на ось абсцисс и делят этот отрезок на три равные части. Через точку  $C$  и начало координат проводят прямую, а параллельно ей – касательную к кривой растяжения. Точка касания «Р» (рис. 1.5б) определит величину  $P_{\text{пц}}$ , по которой рассчитывается  $\sigma_{\text{пц}}$ .

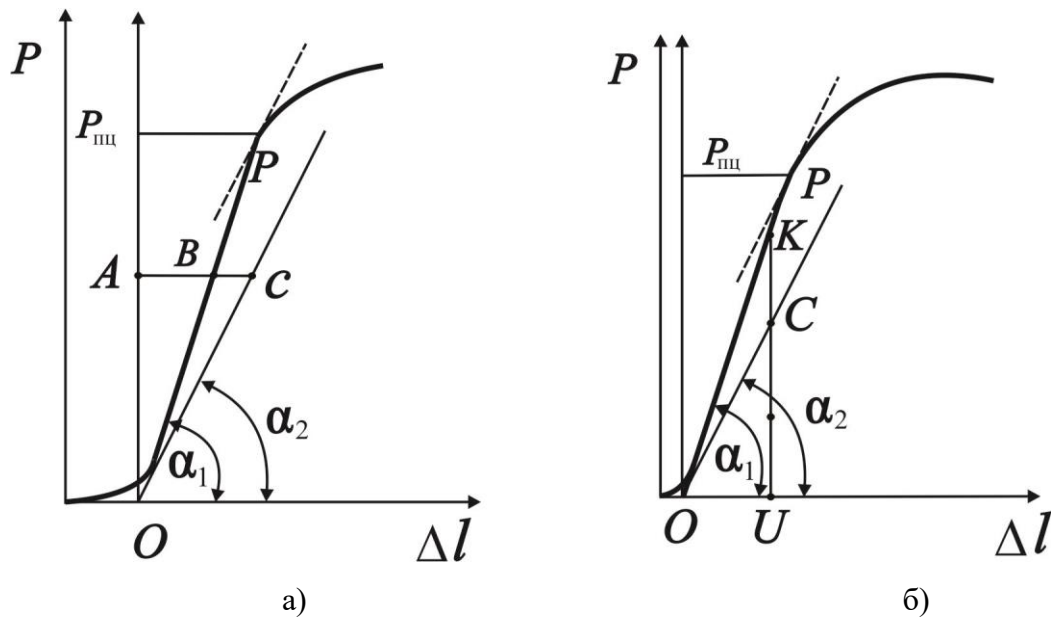


Рис. 1.5. Графические способы определения предела пропорциональности

В процессе определения предела пропорциональности можно оценить и величину модуля нормальной упругости. Для этого необходимо перевести использованный отрезок нагрузки  $KU$  в соответствующий прирост напряжений  $\Delta\sigma$ , а абсолютное удлинение  $OU$  в упругой области – в относительное  $\Delta\delta$ . Поскольку в области упругой деформации поперечное сечение образца почти не меняется,  $\Delta\sigma \cong \Delta S$ , а  $\Delta\delta$  очень близко к приросту истинного относительного удлинения  $\Delta\epsilon$ . Тогда:

$$E = \frac{\Delta S}{\Delta\epsilon} \cong \frac{\Delta\sigma}{\Delta\delta}.$$

Прецизионное определение характеристик сопротивления материалов упругой и начальной пластической деформации (модуля упругости, пределов пропорциональности и упругости) возможно при использовании высокоразрешающих датчиков продольной деформации – экстензометров. Приборы, предназначенные для измерения и регистрации микро- и макродеформаций, могут иметь разные принципы действия. Среди них индуктивные, тензорезисторные, оптические и лазерные датчики. Экстензометры подразделяются на контактные и бесконтактные, аналоговые и цифровые, автоматические и ручные или навесные. Измерение деформации начинают после предварительного растяжения образца до достижения начального усилия  $P_0$ , соответствующего  $\sim 10\%$  от примерно ожидаемого предела пропорциональности.

На диаграмме растяжения (рис. 1.4) точкой «е» определяется предел упругости – наименьшее напряжение, при котором впервые появляется остаточное удлинение заданной

величины:  $\sigma_{\text{от}} = \frac{P_{\text{от}}}{F_0}$ . Для его нахождения по оси деформаций откладывается величина заданного остаточного удлинения. Через полученную на абсциссе точку проводят линию, параллельную прямолинейному участку диаграммы, до пересечения с кривой растяжения. Точка пересечения отвечает нагрузке, по которой и рассчитывают условный предел упругости при заданном допуске. Допуск на остаточное удлинение при расчете предела упругости чаще всего составляет 0,05 %, иногда меньше – вплоть до 0,005 %. Таким образом, предел упругости характеризует напряжение, при котором появляются первые признаки пластической (остаточной) деформации. Используемый при расчете допуск указывается в обозначении условного предела упругости:  $\sigma_{0,05}$ ;  $\sigma_{0,01}$  и т.д. Из-за малого допуска по величине остаточной деформации точный расчет  $\sigma_{\text{уп}}$  по диаграмме растяжения затруднителен и часто его принимают равным  $\sigma_{\text{пл}}$ .

Предел упругости является весьма структурно-чувствительным свойством. В частности, он сильнее, чем другие прочностные характеристики, зависит от исходной плотности дислокаций ( $\rho$ ) в образце. В технических металлах и сплавах даже незначительный предварительный наклеп, повышающий  $\rho$  в пределах одного порядка, вызывает существенное повышение предела упругости. Величина предела упругости прямо пропорциональна  $\sqrt{\rho}$ , а плотность дислокаций линейно возрастает по мере увеличения степени деформации (по крайней мере, до 10-15%).

Точка « $l$ » на сплошной кривой растяжения (рис. 1.4) определяет величину условного предела текучести  $\sigma_0 = \frac{P_l}{F_0}$ , который, как и предел упругости, является условным напряжением, вызывающим определенную остаточную деформацию (удлинение). Однако допуск по величине этого удлинения значительно больше – обычно 0,2 % (предел текучести тогда обозначается  $\sigma_{0,2}$ ). Следовательно, физический и технический смысл условного предела текучести сводится к тому, чтобы охарактеризовать напряжение, при котором происходит уже существенный переход к пластической деформации.

Для определения условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  по оси деформаций от начала координат откладывают (рис. 1.6) отрезок  $OK = \frac{0,2}{100} l_0 M$  ( $l_0$  – начальная расчетная длина образца,  $M$  – масштаб диаграммы по оси абсцисс) и через точку « $k$ » проводят прямую, параллельную прямолинейному участку диаграммы растяжения. Ордината точки « $l$ » будет соответствовать величине нагрузке  $P_{0,2}$ , определяющей условный предел текучести.

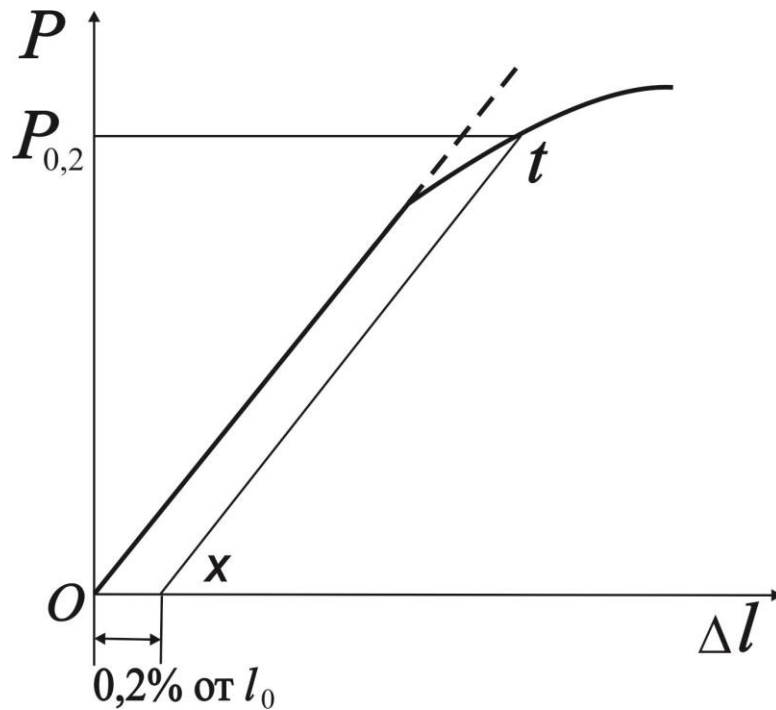


Рис. 1.6. Схема определения условного предела текучести

В ряде случаев на диаграмме растяжения фиксируются зуб и площадка текучести (пунктир на рис. 1.4). Здесь рассчитывают верхний  $\sigma_0^{\hat{a}}$  и нижний  $\sigma_0^{\hat{i}}$  пределы текучести и их разность  $(\sigma_0^{\hat{a}} - \sigma_0^{\hat{i}})$ , определяемую во многих случаях силой блокировки дислокаций

примесями. Верхний предел текучести –  $\sigma_0^{\hat{a}} = \frac{P_t^{\hat{a}}}{F_0}$  – определяется по точке «и» (рис. 1.4) –

максимуму зуба текучести. Нижний –  $\sigma_0^{\hat{i}} = \frac{P_t^{\hat{i}}}{F_0}$  – соответствует уровню площадки на диаграмме

растяжения (рис. 1.4). Длина этой площадки также является важной характеристикой материала. Например, она может определяться прочностью закрепления дислокаций до начала текучести. Чем больше исходная прочность блокировки, тем обычно значительнее величина деформации при движении дислокаций, оторвавшихся от примесных атмосфер, и свежих дислокаций, образующихся в результате размножения.

Рассмотренные выше свойства – пределы пропорциональности, упругости, текучести – являются характеристиками сопротивления материала малым пластическим деформациям. По точке максимума «b» на диаграмме растяжения (рис. 1.4) определяют временное сопротивление

(условный предел прочности)  $\sigma_a = \frac{P_b}{F_0}$ . Поскольку точка «b» на рис. 1.4 соответствует

максимальной равномерной деформации,  $\sigma_b$  характеризует здесь сопротивление этой весьма

значительной деформации (часто 10-20 % по удлинению). Предельную прочность материала  $\sigma_b$  при таком характере диаграммы растяжения не определяет. Истинное напряжение в точке «b»  $S_b = \frac{P_b}{F_b}$  может существенно отличаться от  $\sigma_b$ , так как  $F_b < F_0$ . Однако и оно не характеризует максимальную прочность образца, поскольку при дальнейшей деформации истинные напряжения в шейке продолжают расти вплоть до разрушения образца в точке «k». По ординате этой точки и минимальной площади сечения образца в шейке рассчитывают истинное напряжение разрыву  $S_k = \frac{P_k}{F_k}$ . Однако эта характеристика также отличается определенной условностью, во-первых, из-за неравномерного распределения напряжений по сечению шейки и сложного напряженного состояния, возникающего в ней, и, во-вторых, в результате зависимости  $P_k$  от жесткости испытательной машины.

При деформации образца испытательная машина также упруго деформируется. Эта деформация складывается из деформаций станины, захватов и силоизмерителя. Отношение величины нагрузки ( $P$ ), вызывающей абсолютную суммарную упругую деформацию машины  $\Delta l_m$  к этой  $\Delta l_m$ , называют жесткостью машины  $K_m$ :

$$K_1 = \frac{P}{\Delta l_1}, \text{ (тс/мм)}. \quad (1.4)$$

Из трех составляющих – станина, захваты, силоизмеритель – последний дает наибольший вклад в упругую деформацию машины, так как любой силоизмерительный механизм есть упругий элемент, деформация которого проградуирована в единицах нагрузки. Из этих представлений абсолютно жесткая машина, когда  $\Delta l_m = 0$ , а  $K_m \rightarrow \infty$ , вообще невозможна. Жесткость большинства используемых разрывных машин колеблется от нескольких тс/мм до десятка тс/мм.

Таким образом, в замкнутой системе «образец-машина» последняя исполняет роль упругой пружины, в которой накапливается упругая энергия, причем у менее жесткой (т.е. более податливой) машины эта энергия больше, а энергия:

$$\dot{A}_{\text{от}} = \frac{1}{2} P \Delta l_1.$$

Запасенная энергия будет обязательно выделяться в момент разупрочнения образца, например, спада нагрузки в случае проявления зуба текучести или при разрушении образца. В обоих случаях выделение запасенной упругой энергии резко увеличивает скорость деформирования, и на образец действует повышенная сила, так как при разгрузке машины верхний неподвижный ее захват резко, со скоростью упругого восстановления размеров напряженных частей машины, движется вверх.

Вышеприведенное понятие жесткости имеет техническое и конструкционное значение; оно указывается в паспорте машины. Однако оно не всегда позволяет однозначно определить степень влияния жесткости машины на качество испытаний. Дело в том, что образец, деформируемый в упругой области, также обладает определенной жесткостью, которая аналогично может быть определена как  $\hat{E}_{i\dot{a}\delta} = \frac{P}{\Delta l_{i\dot{a}\delta}}$ . Для замкнутой системы «образец–машина» оценивают коэффициент податливости:

$$q = \frac{K_{i\dot{a}\delta}}{K_i} = \frac{\Delta l_i}{\Delta l_{i\dot{a}\delta}}. \quad (1.5)$$

Чем больше  $q$ , тем меньше жесткость машины по сравнению с жесткостью образца.

При  $K_{обр} > K_m$   $q > 1$ , жесткость образца больше жесткости машины, поэтому запасенная машиной упругая энергия будет передаваться образцу и в момент разрушения усилие разрушения будет завышено.

При  $K_{обр} < K_m$  величина  $q < 1$ , т.е. образец податливее машины. Следовательно, спад нагрузки из-за образования шейки не приведет к значительному завышению деформации образца из-за упругой отдачи машины и для его разрушения необходим непрерывный подвод энергии от привода.

Таким образом, чем меньше жесткость машины по сравнению с жесткостью образца, тем выше на диаграмме точка  $P_k$ , и значение  $S_k$  также будет завышено.

При абсолютно податливой машине ( $q \rightarrow \infty$  – нагружение грузами) спад нагрузки при образовании шейки вообще не фиксируется. Таким образом, все быстротекающие в образце процессы наиболее правильно фиксируются жесткой машиной.

Если вид диаграммы растяжения подобен показанному на рис. 1.3а, то временное сопротивление разрыву  $\sigma_b = S_b = S_k$  и действительно характеризует предельную прочность материала. Для образцов, диаграмма растяжения которых выглядит как на рис. 1.3б,  $S_b = S_k$ .

Стандартные характеристики пластичности при растяжении, относительное удлинение  $\delta$  и сужение  $\Psi$ , определяются без помощи диаграммы растяжения. Однако последняя позволяет расчленить их на важные составляющие – удлинение и сужение при равномерной (до точки «b» на рис. 1.4) и при сосредоточенной деформации (в период образования шейки – с точки «b» до точки «k» на рис. 1.4).  $\delta_{равн}$  и  $\Psi_{равн}$  характеризуют способность материала пластически деформироваться во всем объеме без локализации деформации:

$$\delta_{\delta\dot{a}\dot{a}f} = \frac{(l_b - l_0)}{l_0}; \quad \Psi_{\delta\dot{a}\dot{a}f} = \frac{(F_0 - F_b)}{F_0},$$



$$\delta_{\text{нн}} = \frac{(l_k - l_b)}{l_0} = \frac{(\Delta l_k - \Delta l_b)}{l_0}.$$

Величина  $\psi_{\text{нн}} = \frac{(F_b - F_k)}{F_b}$  определяет запас вязкости материала после локализации

пластического течения. Она косвенно характеризует также сопротивление материала развитию трещины, локальную вязкость в надрезе.

Для определения  $\delta_{\text{равн}}$  и  $\psi_{\text{равн}}$  после разрушения строят кривую распределения локальных удлинений по длине образца (рис. 1.7). Для построения такой кривой на расчетной длине образца наносится некоторое число рисок (10-30) через определенное расстояние  $\Delta l_0$ . После разрыва образца измеряют расстояние между соседними рисками  $\Delta l_p$  и разницу  $\Delta l_i = \Delta l_p - \Delta l_0$  откладывают по оси ординат, рис. 1.7. На этой кривой между шейкой и головками образца имеется зона, где  $\Delta l_i$  постоянны ( $\Delta l_b$ ) и соответствуют  $\delta_{\text{равн}}$ .

Из условия сохранения объема до и после деформации следует:

$$V = (1 + \delta_{\text{дд}}) l_0 (1 - \psi_{\text{дд}}) F_0 = V_0 = l_0 F_0$$

откуда:

$$\psi_{\text{дд}} = \frac{\delta_{\text{дд}}}{1 + \delta_{\text{дд}}}.$$

Сосредоточенные удлинение и сужение находят по разности между конечными  $\delta$ ,  $\psi$  и  $\delta_{\text{равн}}$ ,  $\psi_{\text{равн}}$ .

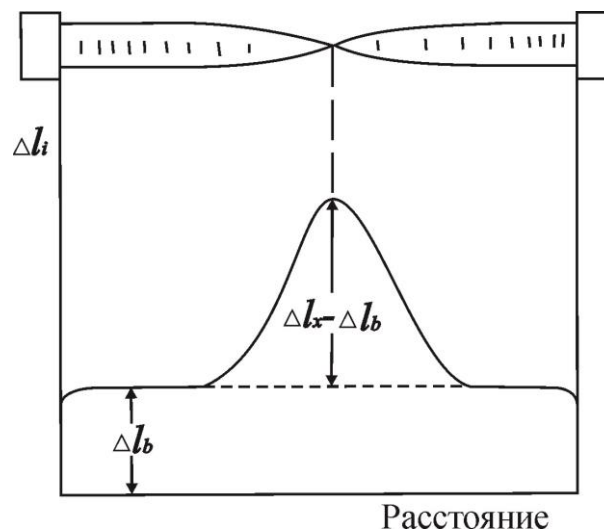


Рис. 1.7. Распределение удлинения по расчетной длине образца

Использование в процессе испытания на растяжение экстензометра, измеряющего и записывающего продольную деформацию с высокой точностью, позволяет значительно

упростить определение относительного удлинения. В этом случае относительное удлинение после разрыва (в точке «*k*» на рис. 1.4) и относительное равномерное удлинение (в точке «*b*») определяются по диаграмме растяжения:

$$\delta = \frac{\Delta l_k}{l_0}; \delta_{\text{равн}} = \frac{\Delta l_b}{l_0}.$$

Кроме характеристик прочности и пластичности, диаграмма растяжения позволяет определить работу деформации образца. Полная работа деформации до разрушения определяется площадью под первичной диаграммой растяжения:

$$A = \int_{l_0}^{l_k} P \cdot dl.$$

## 2.2 Испытательные машины

Испытания на растяжение проводятся на специальных испытательных машинах — разрывных или универсальных. Они предназначены для проведения статических испытаний на растяжение, сжатие и изгиб. Основными узлами испытательных машин являются нагружающее устройство, обеспечивающее плавное приложение нагрузки к образцу, и силоизмеритель, измеряющий действующую на образец нагрузку в процессе испытания.

По схеме нагружающего устройства различают машины с электромеханическим и гидравлическим приводами. В машинах с электромеханическим приводом вращение от электродвигателя посредством механической передачи передается паре винтов. Вращаясь в шпindelной гайке, они перемещают подвижный захват, растягивая испытываемый образец. Электромеханические машины изготавливаются относительно небольшой мощности — на нагрузки не более 60 т.

Гидравлический привод обычно применяется в машинах большей мощности, рассчитанных на нагрузки вплоть до 200 т. В этих машинах подвижный захват перемещается за счет давления, создаваемого насосной станцией, в гидроцилиндре, с которым этот захват связан.

Для измерения нагрузки в современных испытательных машинах используются тензометрические датчики силы, преобразующие физические величины в электрически измеряемые. Силовизмеритель состоит из жесткого упругого корпуса, воспринимающего механические деформации, и наклеенных на него резисторных тензодатчиков — электрических сопротивлений, которые подключены по схеме электроизмерительного моста (рис. 1.8). Тензодатчик представляет собой тонкую проволоку или фольгу из материала (обычно константана) с высоким коэффициентом тензочувствительности — отношением изменения

электросопротивления ( $\Delta R/R_0$ ) к упругому относительному удлинению. Проволоку (фольгу) укладывают определенным образом на тонкую бумажную подкладку.

Тензодатчики для фиксации усилий наклеивают на упругий элемент (тонкостенный стальной цилиндр), который является соединительным элементом одного из захватов машины с ее рамой (с верхней или нижней траверсой соответственно). При растяжении образца его сопротивление деформации вызывает в упругом элементе напряжения и соответствующие им упругие деформации, в результате чего пропорционально меняется электросопротивление тензодатчиков, нарушая баланс моста. Величину измеряемого напряжения на выходе мостовой схемы градуируют с помощью образцовых динамометров в единицах измеряемой силы, которая воздействует на упругий элемент и на всю систему датчиков. Полярность измеряемого напряжения изменяется с направлением нагружения растяжением или сжатием.

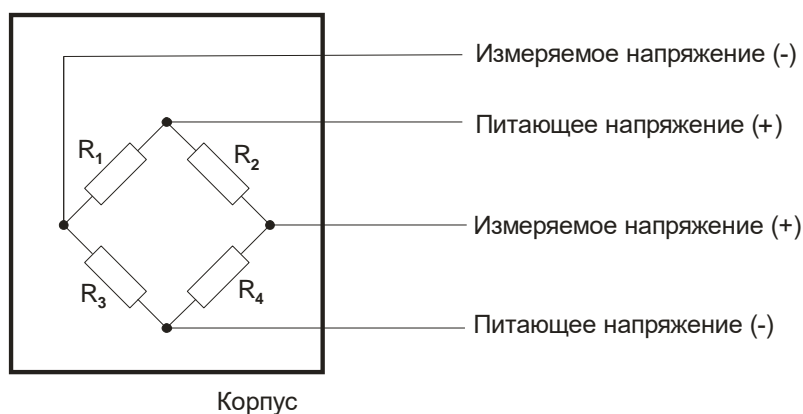


Рис. 1.8. Схема измерительного моста с тензодатчиками

Рассмотрим конструкции некоторых испытательных машин с электромеханическим приводом.

### ***Разрывная машина ИР 5057-50***

Эта машина (рис. 1.9) предназначена для испытаний на растяжение, а также сжатие и изгиб при наибольшей предельной нагрузке 50 кН. Машина состоит из основания 1, ходовых винтов 7 и верхней неподвижной траверсы 5, образующих жесткую раму. На верхней траверсе 5 установлены тензорезисторный силоизмеритель 4 и оптоэлектронный датчик угла поворота 6 одного из ходовых винтов 7 (датчик перемещения подвижной траверсы). Перемещение подвижной траверсы 2 по направляющим колоннам происходит ввинчиванием или вывинчиванием ходовых винтов 7 в соответствующие неподвижные гайки – шарико-винтовые шпиндели траверсы. На раме машины установлен микропроцессорный пульт управления 8.

Прием, регистрация и обработка результатов испытания, вывод на дисплей компьютера диаграммы «нагрузка–перемещение активного захвата», определение прочностных характеристик материала испытываемого образца и распечатка протокола и диаграммы испытания осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения.

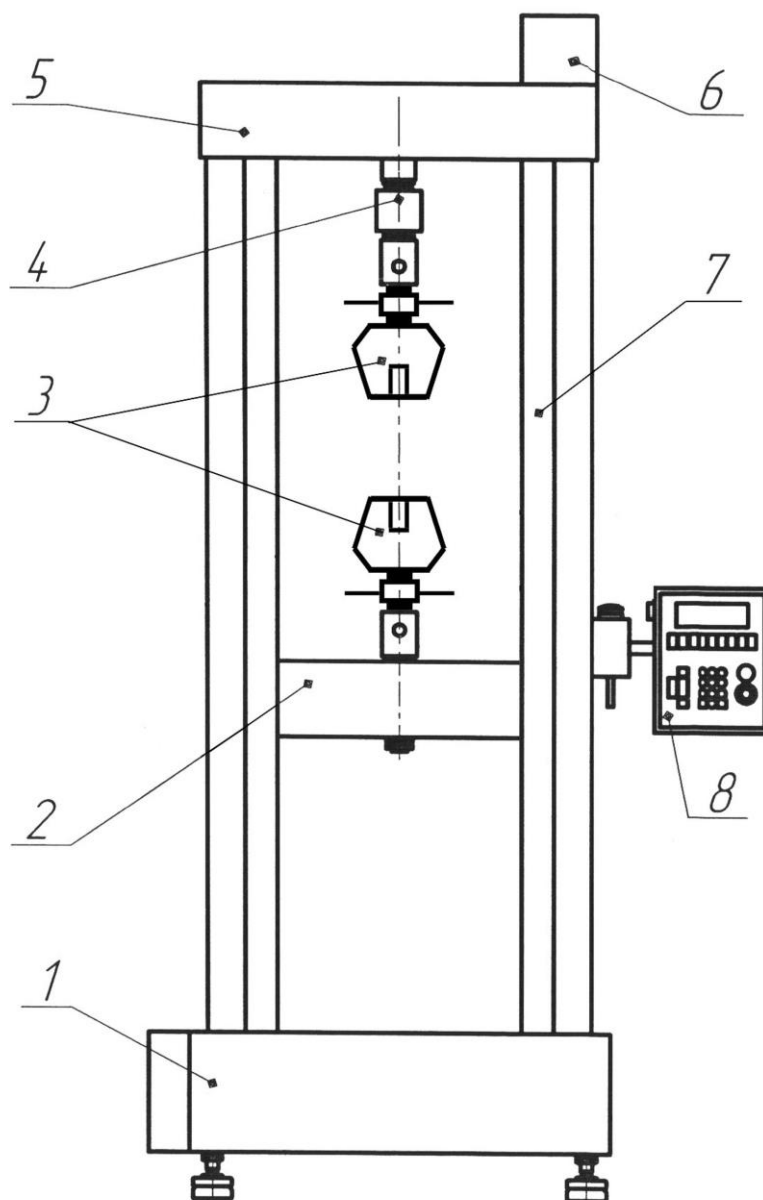


Рис. 1.9. Схема разрывной машины ИР 5057-50:

- 1 – основание; 2 – траверса подвижная; 3 – захваты; 4 – силоизмеритель;  
 5 – траверса неподвижная; 6 – датчик перемещения (хода) траверсы; 7 – ходовые винты;  
 8 – пульт управления

Порядок работы на машине следующий.

- Устанавливают на пульте управления 8 (рис. 1.9) требуемые параметры методики испытания (клавиша «F3»).

- Устанавливают на машину необходимые для проведения испытания приспособления.

- Включают привод.

- Перемещают в ручном режиме траверсу 2 в исходное положение клавишей «↑» или «↓».

- Устанавливают образец.

- Выбирают методику «Растяжение» или «Сжатие» (клавиша «F2»).

- Запускают испытание (клавиша «Тест»).

В случае нештатных ситуаций выключают привод путем нажатия клавиши «Стоп». После нажатия клавиши «Тест» текущие показания силоизмерителя 4 обнуляются, и подвижная траверса 2 начинает движение вверх или вниз в зависимости от вида испытания (растяжение или сжатие). После достижения заданной предварительной нагрузки скорость снижается до основной скорости проведения испытания. После разрушения образца траверса останавливается, а на дисплей выводится информация о результатах испытания. Если образец был разрушен в соответствии с требованиями методики, то необходимо «Принять» результаты испытания в серию. Иначе необходимо «Отменить» результаты и провести испытание повторно. После принятия того или иного решения на дисплее отображается «основной экран» и, в случае если выбран возврат траверсы в исходное положение по команде оператора, нажимают клавишу «ОК» для возврата траверсы, либо клавишу «Стоп» для отмены возврата.

### ***Универсальная испытательная машина Zwick Z250***

Универсальная испытательная машина Z250 (рис. 1.10) предназначена для проведения статических испытаний на растяжение, сжатие и изгиб при усилиях вплоть до 250 кН. Ее электромеханический привод характеризуется возможностью регулирования скоростей деформирования от 0,0005 до 600 мм/мин.

Нагружающая рама испытательной машины состоит из основания 1, направляющих колонн 2 и шарико-винтовых шпинделей, неподвижной 3 и подвижной траверсы 4. Подвижная траверса с закрепленными на ней датчиком силы 5 и клиновинтовым захватом 6 перемещается по направляющим колоннам посредством вращения двух винтовых шпинделей. Второй захват 6 закреплен на неподвижной траверсе 3.

Одним из основных элементов испытательной машины Z250 является блок электроники *testControl* 9, предназначенный для управления машиной, регистрации измеряемых значений и

обработки данных в режиме реального времени с частотой до 500 Гц. Управление электронным блоком осуществляется через персональный компьютер с помощью специализированной программы *testXpert*. Для упрощенной эксплуатации машины предусмотрен пульт дистанционного управления 10. С его помощью возможно выполнение команд перемещения траверсы.

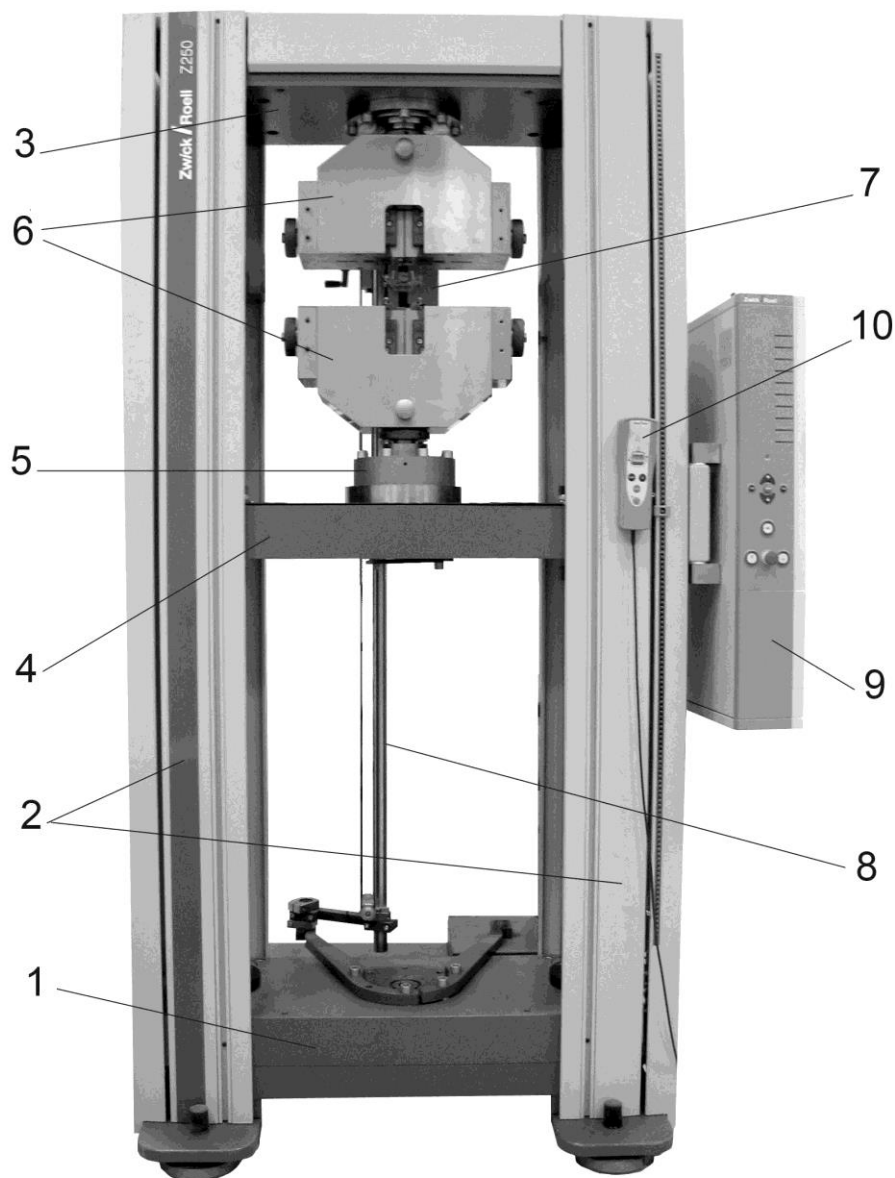


Рис. 1.10. Внешний вид универсальной испытательной машины Z250  
фирмы Zwick (Германия):

- 1 – основание; 2 – направляющие колонны; 3 – неподвижная траверса; 4 – подвижная траверса;  
5 – датчик силы; 6 – клиновинтовые захваты; 7 – датчик продольной деформации  
(экстензометр); 8 – направляющая колонна датчика деформации; 9 – блок электроники;  
10 – пульт дистанционного управления

Для высокоточного измерения деформации образцов в процессе испытаний на машине смонтирован автоматический датчик продольной деформации (экстензометр) 7, перемещающийся по направляющей колонне 8. Внешний вид датчика деформации представлен на рис. 1.11. Каждый из четырех щупов 2 экстензометра 1 имеет измерительный элемент, соединенный с мостовым тензодатчиком. Измерительные элементы правой и левой пары щупов соединены параллельно для получения среднего значения, что важно, если образец деформируется неравномерно. С помощью шарикоподшипниковой системы тахомоторы постоянного тока компенсируют изменения в сигнале, приходящем от измерительного элемента. Эти изменения появляются в результате удлинения образца. Такая система обеспечивает перемещение измерительных головок в процессе удлинения образца. Удлинение же фиксируется оптической измерительной системой.

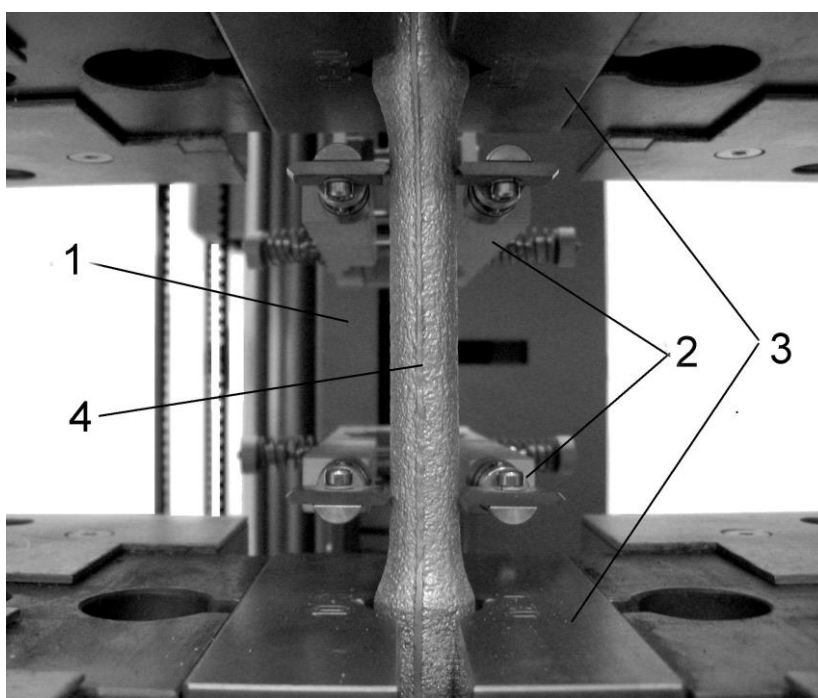


Рис. 1.11. Внешний вид автоматического контактного датчика продольной деформации (экстензометра) во время испытания:

1 – датчик деформации; 2 – щупы; 3 – захваты; 4 – образец

Преимущество автоматического экстензометра перед навесным (может использоваться с разрывной машиной ИР 5057-50) заключается в том, что измерительные щупы устанавливаются на образце автоматически, при этом измерение удлинения осуществляется вплоть до разрушения образца с определением относительного удлинения после разрыва. Навесной же крепится на образце вручную и перед разрывом во избежание повреждения обязательно

снимается. Таким образом, в случае использования навесного экстензометра относительное удлинение после разрыва не определяется.

В целом, испытательная машина Z250 по сравнению с ИР 5057-50 обладает большей жесткостью и более высокой точностью позиционирования подвижной траверсы.

Принцип работы на испытательной машине Z250 сходен с порядком работы на машине ИР 5057-50. Основное отличие заключается в том, что настройка методики испытания, управление испытанием и обработка результатов осуществляется только посредством компьютерного программного обеспечения. Полный автоматический расчет механических характеристик образца, как и при работе на машине ИР 5057-50, в процессе испытания разделен на два этапа. Первый этап включает в себя автоматический поиск на диаграмме испытания участка упругой деформации с помощью методов аппроксимации. Во время второго этапа автоматически анализируется вид диаграммы и определяются свойства образца.

### 2.3 Испытания на сжатие

Испытание на сжатие проводят на универсальных испытательных или разрывных машинах. Рассмотрим методику проведения испытаний на сжатие на машине типа ИР 5057-50. Для испытаний на сжатие и изгиб на машинах такого типа и некоторых других может применяться реверсор — устройство, обеспечивающее сжимающие усилия на образце при движении подвижного захвата вниз, как при растяжении. В реверсоре 3 устанавливают две опорные плиты (рис. 1.12). Образец 1 после замера его диаметра и высоты помещается на нижнюю плиту. При установке образца перед испытанием необходимо следить, чтобы его вертикальная ось совпала с осью реверсора и опорных плит. Далее все операции проводятся так же, как и при растяжении, в том числе и регистрация действующих на образец усилий и запись диаграммы сжатия. Следует сказать, что во всех испытательных машинах сжатие, как правило, производится простым перемещением нижней подвижной траверсы вверх без использования реверсора.

Для испытаний на сжатие чаще всего применяют цилиндрические образцы с отношением высоты к диаметру от 1 до 3 ( $H = 1 \div 3D$ ). Величина отношения  $H/D$  существенно сказывается на величине напряжений и деформаций при сжатии. Чем короче образец, тем обычно выше возникающее в нем напряжение при данной величине деформации сжатия.



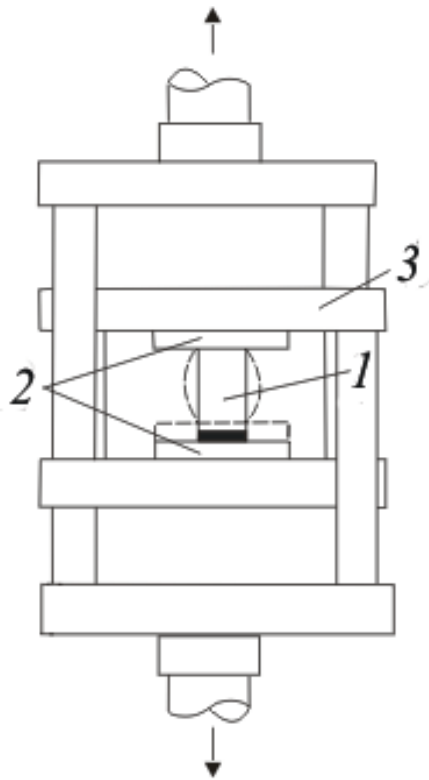


Рис. 1.12. Схема испытания на сжатие с использованием реверсора.

Типичный вид кривых сжатия пластичного и хрупкого (при растяжении) материалов показан на рис. 1.13. Сравнительно пластичные материалы не разрушаются при сжатии. Поэтому при их испытании не могут быть определены такие важнейшие характеристики, как относительное укорочение ( $\varepsilon$ ), расширение ( $\psi$ ) и предел прочности. Эти характеристики при испытании мало пластичных материалов определяются так же легко, как и при растяжении:

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H_k}{H_0} \cdot 100\% ; \quad (1.6)$$

$$\sigma_{\text{пре}} = \frac{P_{\text{max}}}{F_0} ; \quad (1.7)$$

$$\psi = \frac{F_k - F_0}{F_0} \cdot 100\% . \quad (1.8)$$

Кроме того, по диаграмме сжатия можно определять и пределы пропорциональности

$$\sigma_{\text{по}} = \frac{P_{\text{по}}}{F_0} \text{ и текучести } \sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0} \text{ (рис. 1.13).}$$

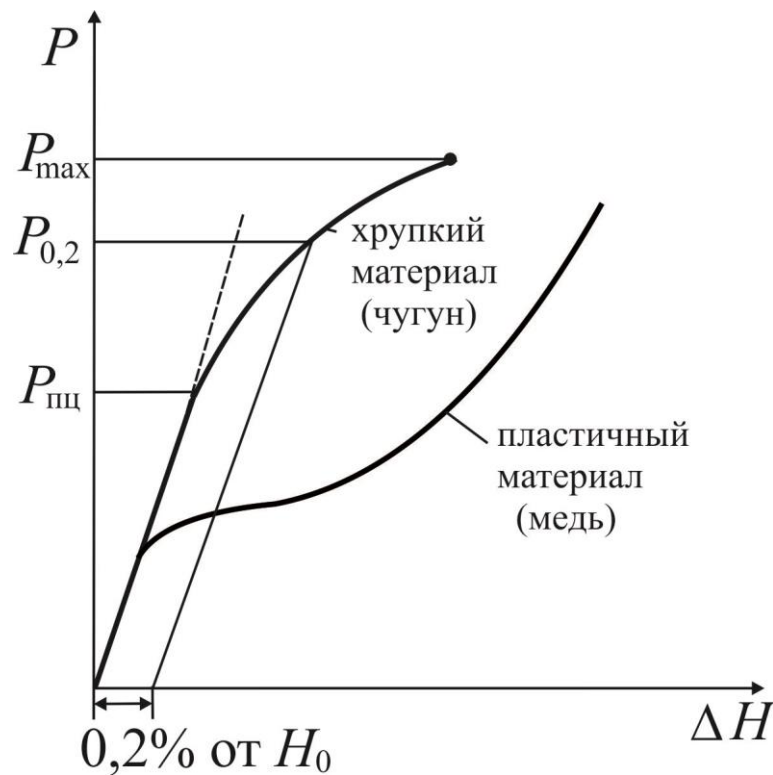


Рис. 1.13. Диаграммы сжатия

Испытания на сжатие позволяют с большей достоверностью оценить прочностные и особенно пластические свойства хрупких при растяжении материалов (например, чугунов, многих цветных сплавов в литом состоянии, интерметаллических соединений). Основным недостатком испытания на сжатие является трудность получения одноосного напряженного состояния в образце из-за действия сил трения между торцами образца и опорными плитами в процессе испытания. Для уменьшения сил трения используют специальные приемы: передачу усилий через конические поверхности, различные виды смазок между торцевыми поверхностями и т.д.

## 2.4 Испытания на изгиб

Для проведения испытаний на изгиб на машине также устанавливается реверсор, на плиту 4 (рис. 1.14) которого помещается опорная плита 3. Образец 2 помещается на опоры. В верхней подвижной плите реверсора 5 устанавливается изгибающий нож 1. Далее испытания проводятся согласно описанному выше порядку работы на машине типа ИР 5057-50.

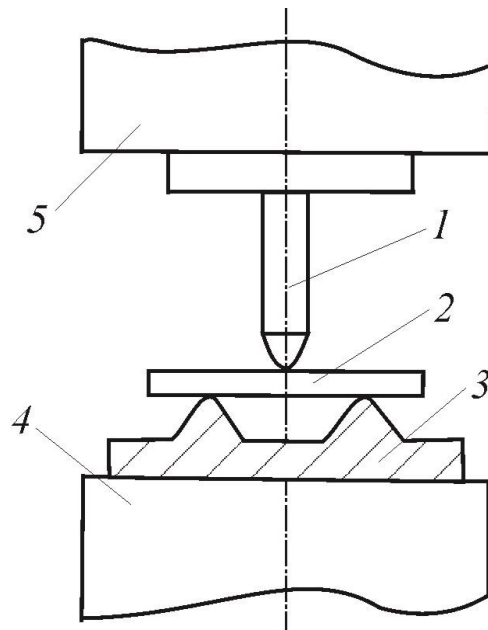


Рис. 1.14. Схема испытания на изгиб:

1 – нож; 2 – образец; 3 – опорная плита; 4, 5 – плиты реверсора

В описанной схеме изгиба, когда образец находится на двух неподвижных опорах, а нагрузка прилагается в середине его длины, изгибающий момент  $M = \frac{Pl}{4}$  (рис. 1.15) При испытании может быть записана кривая изгиба, которая для пластичного материала выглядит так, как показано на рис. 1.16 (в случае хрупкого материала кривая обрывается в точке «b»). По оси абсцисс на кривой изгиба откладывается стрела прогиба  $f$  (рис. 1.15), являющаяся мерой абсолютной деформации. Величина нагрузок  $P_{\text{пц}}$ ,  $P_{0,2}$ ,  $P_b$  дает возможность определить пределы пропорциональности, текучести и прочности при изгибе. Расчет условных нормальных напряжений в крайнем волокне сечения при изгибе с достаточной точностью может проводиться лишь для упругого состояния или при малой пластической деформации. Это значит, что по результатам испытаний на изгиб всегда можно определить  $\sigma_{\text{пц}}$  и  $\sigma_{0,2}$ , а  $\sigma_{\text{â}}^{\text{âçä}}$  – только для хрупких материалов:

$$\sigma_{\text{ïö}} = \frac{P_{\text{ïö}} l}{4W}. \quad (1.9)$$

Соответственно (рис. 1.15, 1.16):

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2} l}{4W}; \quad (1.10)$$

$$\sigma_{\text{â}}^{\text{âçä}} = \frac{P_b l}{4W}. \quad (1.11)$$

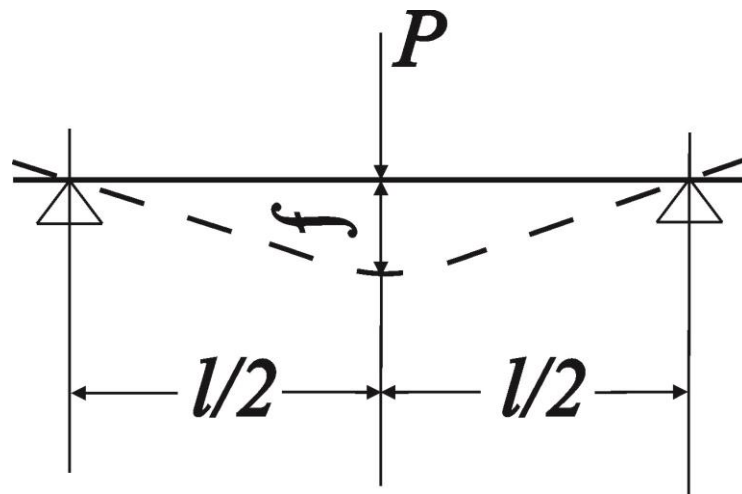


Рис. 1.15. Схема изгиба образца

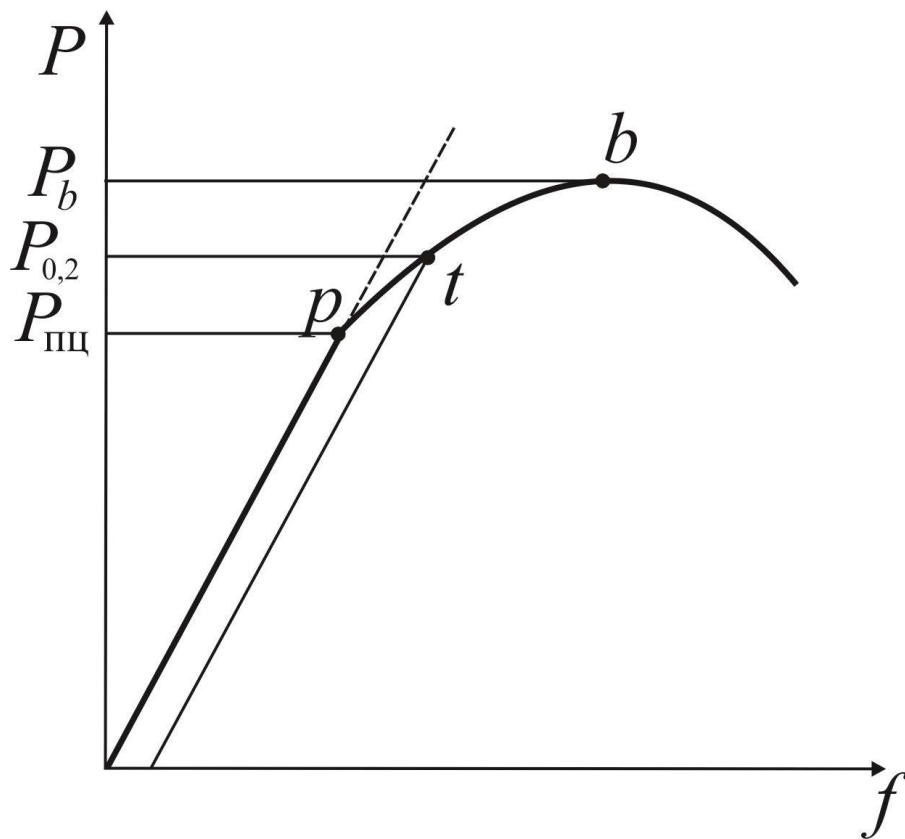


Рис. 1.16. Диаграмма изгиба

Момент сопротивления  $W$  для образца с прямоугольным сечением высотой  $h$  и шириной  $b$  равен  $W = \frac{bh^2}{6}$ ; для образца с круглым сечением диаметром  $d_0$  —  $W = \frac{\pi d_0^3}{32}$ . Отсюда для цилиндрических образцов изгибающее напряжение  $\sigma = \frac{8Pl}{\pi d_0^3}$ . Для испытаний на изгиб применяют образцы прямоугольного или круглого сечения, без головок. Как правило, ширина прямоугольных образцов должна быть равна  $(1-2)h$ , где  $h$  — толщина образца. Длина образцов

обычно составляет 120-200 мм. Расстояние между опорами рекомендуется рассчитывать по следующей формуле:  $l = (D + 3a) \pm \frac{a}{2}$ , где  $D$  – диаметр изгибающего ножа,  $a$  – толщина или диаметр образца, мм.

Испытания на изгиб, так же как и на сжатие, проводят чаще всего на хрупких материалах, свойства которых при растяжении трудно определить. Кроме того, хрупкие материалы и сплавы в условиях службы обычно разрушаются именно от изгиба.

## 2.5 Метод поверки машины ИР 5057-50

Все испытательные машины подлежат периодической проверке точности показаний силоизмерителя. Для этих целей используют специальный динамометр, который нагружают в проверяемой машине и сравнивают показания машины и динамометра. Динамометры могут быть двух типов – механические и электрические. Механические чаще всего представляют собой кольцевую, эллипсообразную или прямоугольную упругую скобу из пружинной стали. Деформация этой скобы на сжатие или растяжение измеряется часовым индикатором, проградуированным в единицах силы.

Перед началом поверки динамометр устанавливают на машине и производят ее плавное нагружение до верхнего предела диапазона измерения силоизмерителя (или динамометра) и выдерживают под нагрузкой около 5 мин. Затем также плавно разгружают и при необходимости устанавливают нуль системы силоизмерения и динамометра.

После этого приступают к проверке показаний силоизмерителя машины. Машину медленно нагружают, задавая нагрузку по динамометру, затем снимают отсчет с силоизмерителя. Для каждой проверяемой точки измерение нагрузки производят три раза и определяют среднее показание силоизмерителя  $\dot{a}_{\text{пд}} = \frac{\dot{a}_1 + \dot{a}_2 + \dot{a}_3}{3}$ , а затем среднюю

относительную погрешность  $\Delta = \frac{a_{\text{пд}} - A}{A} \cdot 100 \%$ , где  $A$  – действительное значение силы, Н.

Машина считается исправной, если погрешность не превышает  $\pm 1\%$  от действительной нагрузки.

### 3. Техника безопасности в лаборатории механических испытаний

Испытательные машины и приборы лаборатории механических испытаний являются источниками возможных травм от движущихся частей механизмов (вращающиеся валы, муфты, передачи, подвижные траверсы), а также источниками поражения электрическим током от устройств электропитания и электропривода.

Для предупреждения механических повреждений обслуживающего персонала все подвижные части машин и установок должны быть закрыты глухими крышками и кожухами, плотно прикрепленными к станине или другим неподвижным частям машины. Крышки на сменных зубчатых или ременных передачах должны быть откидными с принудительным закрыванием.

Электрическая аппаратура и соединительные токоведущие устройства оборудования должны быть надежно изолированы и закрыты в корпусе установки или в специальных, закрытых со всех сторон шкафах, коробках и т.п. Запрещается работать со снятыми крышками ограждения электроарматуры.

Дверцы электрошкафов, закрывающие доступ к токоведущим частям, должны быть заблокированы таким образом, чтобы при открывании система обесточивалась.

Электроприводы машин и проводка должны быть защищены от механического и химического воздействия во избежание повреждения изоляции. Все наружные клеммы и закрепленные ими концы проводов должны быть закрыты коробками.

Во избежание поражения обслуживающего персонала током при нарушении изоляции, токоведущие части и корпуса различных установок должны быть надежно заземлены. Качество заземления проверяется регулярно не реже одного раза в год.

В процессе выполнения лабораторных работ студентам запрещается самостоятельно проводить испытания без проверки преподавателем или лаборантом правильности осуществления всех подготовительных операций.

### 4. Задание по работе

1. Ознакомиться с методикой испытаний на растяжение, сжатие и изгиб на машинах типа ИР 5057-50 и Zwick Z250.

2. Провести на машине ИР 5057-50 испытания на растяжение и сжатие литого сплава Al-5%Cu в закаленном состоянии, и на изгиб сплава Al-6%Mg в литом состоянии.

Результаты всех измерений при испытании на растяжение отразить в следующей таблице:

Сплав	$d_0$ , мм	$F_0$ , мм <sup>2</sup>	$d_k$ , мм	$F_k$ , мм <sup>2</sup>	$l_0$ , мм	$l_k$ , мм	$P_{\text{пц}}$ , Н	$P_{0,2}$ , Н
1	2	3	4	5	6	7	8	9

$P_b$ , Н	$P_k$ , Н	$\sigma_{\text{пц}}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$S_k$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
10	11	12	13	14	15	16	17

Для каждого образца, испытанного на растяжение, рассчитать по первичной диаграмме растяжения  $\sigma_{\text{пц}}$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ,  $S_k$ ; по результатам испытаний на сжатие определить  $\sigma_{\text{сж}}$ ,  $\varepsilon$  и  $\psi$ ; по результатам испытаний на изгиб –  $\sigma_{\text{изг}}$  и  $f$  после разрушения.

4. Сравнить и объяснить различия в свойствах образцов, подвергнутых разным видам испытаний.

### 5. Требования к отчету

В отчете по работе должны быть представлены краткий конспект темы и все полученные результаты расчета механических характеристик в виде таблиц. Для всех определенных средних значений механических свойств должны быть рассчитаны доверительные интервалы. Все результаты первичных измерений заносятся в лабораторную тетрадь немедленно и без какой-либо обработки.

### 6. Литература

1. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998, с. 150-173, 196-206.

### 7. Контрольные вопросы

1. Из отношения каких характеристик определяется коэффициент мягкости при растяжении?
2. Каков коэффициент мягкости испытаний на растяжение?
3. Каков коэффициент мягкости испытаний на сжатие?
4. Чему равна расчетная длина плоского образца на растяжение, если его ширина равна 10 мм, а рабочая длина 80 мм?

5. Как задается допуск на отклонение от закона пропорциональности при графическом определении  $\sigma_{\text{пл}}$ ?
6. Как задается допуск при определении предела упругости?
7. Чем определяется длина площади текучести?
8. Что такое жесткость испытательной машины?
9. Как рассчитывается коэффициент податливости и что он определяет?
10. Каково соотношение между равномерным относительным удлинением и усилием?
11. Как рассчитать сосредоточенное относительное сужение?
12. Как рассчитывается равномерное относительное сужение?
13. Как рассчитать равномерное относительное удлинение?
14. Какой тип силоизмерителя у машины ИР 5057-50?
15. Каково соотношение высоты  $H$  и диаметра  $D$  образцов для испытаний на сжатие?
16. Чему равен предел текучести при изгибе, если  $P_{0,2} = 1000$  Н, диаметр образца 4 мм, а расстояние между опорами 100 мм?
17. Чему равен предел прочности при изгибе образца диаметром 10 мм при  $P_{\text{max}} = 1500$  Н и расстоянии между опорами 100 мм?
18. Какие прочностные характеристики не могут быть определены при испытании на изгиб образца меди?
19. Каковы отличия между универсальной испытательной машиной Zwick Z250 и машиной ИР 5057-50?
20. Что такое экстензометр и для чего он предназначен?



## Лабораторная работа 2

### РАСЧЕТ ДИАГРАММ ИСТИННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ПЕРВИЧНЫМ КРИВЫМ РАСТЯЖЕНИЯ

(3 часа)

#### 1. Цель работы

Освоение расчетного метода построения диаграмм истинных напряжений по первичным кривым растяжения.

#### 2. Теоретическая часть

По первичным кривым растяжения определяют механические свойства, выражаемые через условные напряжения. С увеличением степени деформации растет разница между ними и истинными напряжениями, которые только и являются, по сути дела, характеристикой сопротивления материала деформации. Поэтому в исследовательских работах при решении многих задач возникает необходимость построения диаграмм истинных напряжений  $S$ – $e$ . Однако это можно сделать только в тех случаях, когда образцы разрушаются на стадии равномерной деформации, без образования шейки. Поэтому на практике эти диаграммы часто строятся в координатах  $S$ – $\psi$ .

Схема типичной диаграммы истинных напряжений образца, разрушившегося с образованием шейки, показана на рис. 2.1. Как видно, геометрия этой диаграммы качественно отличается от соответствующей первичной (см. рис. 1.4 в лабораторной работе 1). Эта диаграмма в координатах  $S$ – $\psi$  обладает интересными свойствами. В частности, продолжение прямолинейного участка диаграммы за точкой «b» до пересечения с осью  $S$  дает возможность примерно оценить величину  $\sigma_b$ , а его экстраполяция до точки «c», соответствующей  $\psi = 1$  (100 %), даст  $S_c = 2S_e$ .

Диаграмма истинных напряжений показывает, что материал продолжает упрочняться вплоть до разрушения, несмотря на образование шейки. Коэффициент деформационного упрочнения может быть рассчитан в любой точке этой диаграммы как  $K = \operatorname{tg} \beta = \frac{dS}{d\psi}$  (или  $\frac{dS}{de}$ ).

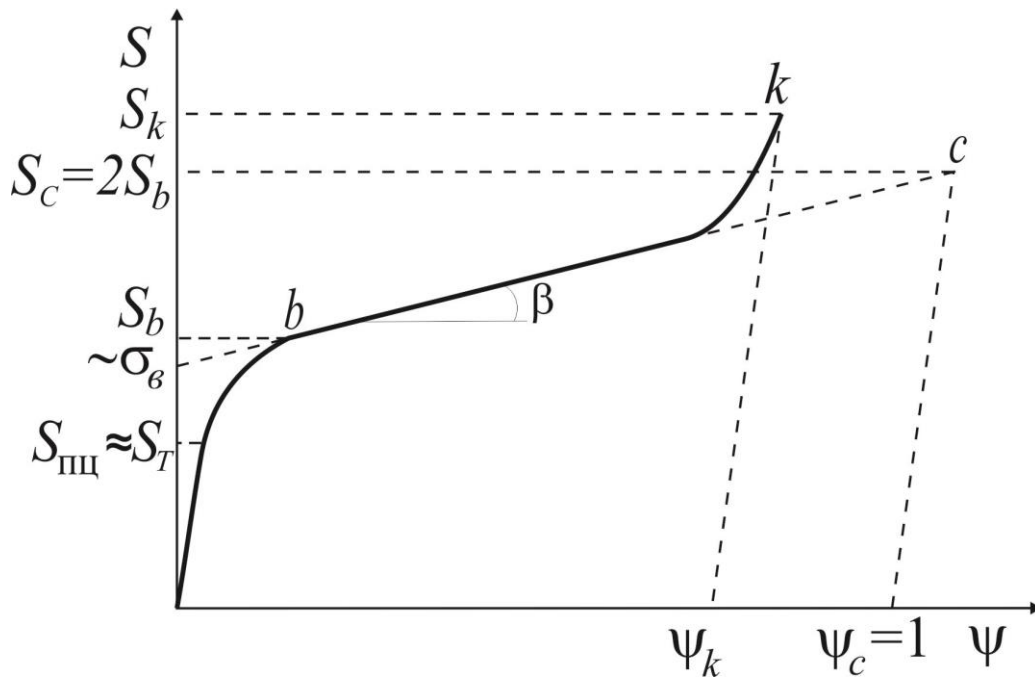


Рис. 2.1. Диаграмма истинных напряжений

На стадии равномерной деформации (во многих случаях она простирается вплоть до разрушения) возможен аналитический пересчет первичной кривой растяжения в диаграмму истинных напряжений без экспериментального определения площади сечения образца в процессе испытания. Эти расчеты особенно важны для сверхпластичных сплавов, равномерное удлинение которых может достигать сотен и тысяч процентов. В любой момент равномерной деформации истинное напряжение

$$S_i = \frac{P_i}{F_i}, \quad (2.1)$$

где  $P_i$  – усилие, а  $F_i$  – площадь сечения образца в данный момент испытания.

Из условия постоянства объема при пластической деформации следует, что

$$F_0 l_0 = F_i l_i, \quad (2.2)$$

где  $F_0, F_i$  – площади, а  $l_0$  и  $l_i$  – расчетные длины в начальный и рассматриваемый момент испытания, соответственно.

Следовательно, истинное напряжение

$$S_i = \frac{P_i l_i}{F_0 l_0} \quad (2.3)$$

и его можно рассчитать в любой точке первичной диаграммы растяжения, поскольку  $F_0$  и  $l_0$  известны до опыта, а  $F_i$  и  $l_i = l_0 + \Delta l_i$  оцениваются по этой диаграмме.

Величина истинного относительного удлинения в любой момент равномерной деформации

$$e_i = \ln \frac{l_i}{l_0} \quad (2.4)$$

также может быть рассчитана по первичной кривой растяжения. Величина истинного напряжения функционально связана со скоростью деформации  $\dot{\epsilon}$ :

$$S = k \dot{\epsilon}^m, \quad (2.5)$$

где  $m$  – показатель скоростной чувствительности, обычно близкий к 0,1, но в некоторых случаях, например, при сверхпластической деформации, достигающий 0,5-0,7;

$k$  – константа материала.

Скорость деформации

$$\dot{\epsilon} = \frac{de}{d\tau} \quad (2.6)$$

или

$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{l_i}, \quad (2.7)$$

где  $V$  – скорость растяжения (скорость перемещения подвижного захвата машины);

$l_i$  – длина расчетной части образца в данный момент испытания.

При малых удлинениях изменением скорости деформации можно пренебречь, но при больших значениях относительного удлинения в условиях испытания с постоянной скоростью растяжения непостоянство (уменьшение) скорости деформации становится существенным. Действительно, если, например, исходная расчетная длина  $l_0 = 20$  мм, а скорость растяжения 10 мм/мин, то начальная скорость деформации  $\dot{\epsilon} = 10/20 = 5 \cdot 10^{-1}$  мин<sup>-1</sup>. Когда образец удлинится по абсолютной величине на 10 мм, то есть относительное удлинение станет равным 50 %,  $\dot{\epsilon}_{(50\%)} = 10/30 = 3,3 \cdot 10^{-1}$  мин<sup>-1</sup>. После относительного удлинения на 100 %  $\dot{\epsilon}_{(100\%)} = 2,5 \cdot 10^{-1}$  мин<sup>-1</sup>, то есть скорость деформации уменьшается в два раза. Для относительного удлинения в 900 %, получающегося у сверхпластичных сплавов,  $\dot{\epsilon}_{(900\%)} = 5 \cdot 10^{-2}$ , то есть скорость деформации уменьшается по сравнению с начальным значением уже на порядок.

Для учета изменения  $S_i$  за счет изменения (уменьшения) скорости деформации в процессе испытания в уравнение (2.3) необходимо внести поправку. Поскольку  $S_1 = k\dot{\epsilon}_1^m$  и  $S_2 = k\dot{\epsilon}_2^m$  при  $\dot{\epsilon}_1 > \dot{\epsilon}_2$ , то

$$\frac{S_1}{S_2} = \left( \frac{\dot{e}_1}{\dot{e}_2} \right)^m \quad (2.8)$$

или иначе, используя выражение (2.7):

$$\frac{S_1}{S_2} = \left( \frac{l_2}{l_1} \right)^m. \quad (2.9)$$

Следовательно, чтобы исключить снижение истинного напряжения из-за уменьшения скорости деформации, необходимо рассчитанное по формуле (2.3) напряжение увеличить на величину  $\left( \frac{l_i}{l_0} \right)^m$ . В конечном итоге получаем:

$$S_i = \frac{P_i}{F_0} \left( \frac{l_i}{l_0} \right)^{m+1}. \quad (2.10)$$

В области сосредоточенной деформации достаточно точные расчеты по данным первичной кривой растяжения становятся невозможными. Здесь необходимо знать изменение величины поперечного сечения, которое оценивается экспериментально. Для этого используют датчики поперечной деформации, которые непрерывно измеряют величину диаметра образца в процессе растяжения. Однако не всегда удастся замерить диаметр центральной части шейки, так как заранее невозможно предусмотреть место ее образования.

В данной работе диаграмма истинных напряжений будет строиться при испытании образцов из алюминиевых сплавов при комнатной температуре. Испытание на растяжение проводится на универсальной испытательной машине Zwick Z250, описание которой дано в лабораторной работе 1.

### 3. Задание по работе

1. Провести на машине Z250 растяжение образца при комнатной температуре с записью первичной кривой растяжения.
2. Разбить первичную диаграмму растяжения на 20 участков и составить для расчетов таблицу значений  $P_i$  и  $\Delta l_i$  в 20 точках.
3. Провести расчет значений  $S_i$ ,  $k_i$  и  $e_i$  в каждой из точек первичной диаграммы растяжения на стадии равномерной деформации без учета изменения скорости деформации, используя компьютерную программу Excel.
4. Построить зависимости  $S-e$  и  $k-e$ , проанализировать полученные результаты и объяснить их.

### 4. Требования к отчету

В отчете по работе должна быть представлена первичная кривая растяжения, координаты ее отдельных точек (в виде таблицы), использованные для расчетов на ЭВМ диаграммы истинных напряжений и кривая  $k-\epsilon$ .

Порядок оформления записей в лабораторной тетради см. в описании к работе 1.

## 5. Литература

1. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. –М.: Металлургия, 1998, С. 186-189.

## 6. Контрольные вопросы

1. В чем различие между истинными и условными напряжениями, когда эту разницу можно, а когда нельзя не учитывать?
2. Как рассчитывается коэффициент деформационного упрочнения?
3. В каких случаях возможен аналитический пересчет первичной кривой растяжения в диаграмму истинных напряжений?
4. Выведите формулу расчета истинного напряжения для любой точки первичной диаграммы растяжения.
5. Как определить истинное относительное удлинение, в чем его физический смысл?
6. Каков физический смысл скорости деформации и как ее определить?
7. Как меняется скорость деформации при испытаниях на разрыв с постоянной скоростью движения траверсы?
8. Как изменяется скорость деформации при испытании на сжатие?
9. Покажите на примерах, как меняется скорость деформации при испытании сверхпластичных сплавов с постоянной скоростью растяжения?
10. Выведите формулу для определения истинного напряжения по первичной кривой с учетом изменения скорости деформации.
11. Как можно построить истинную диаграмму напряжение–деформация в области сосредоточенной деформации?

## Лабораторная работа 3

### ИЗМЕРЕНИЕ ТВЕРДОСТИ

(3 часа)

#### 1. Цель работы

Освоение статических методов определения твердости.

#### 2. Теоретическая часть

Под твердостью понимается свойство материала оказывать сопротивление внедрению в его поверхность другого, более твердого и не получающего остаточной деформации тела (индентора) определенной формы и размера. Испытания на твердость отличаются простотой и высокой производительностью, отсутствием разрушения образца, легко устанавливаемой связью результатов с данными других испытаний. При испытании на твердость в образце под индентором возникает сложное напряженное состояние, которое характеризуется наибольшим коэффициентом мягкости по сравнению с другими видами механических испытаний  $\left( \alpha = \frac{t_{\max}}{S_{\max}^i} > 2 \right)$ . Поэтому здесь возможно получение «пластичных» состояний и определение твердости практически любых, в том числе и весьма хрупких материалов.

Существующие методы измерения твердости различаются по форме индентора, условиям приложения нагрузки и способу расчета чисел твердости. Выбор метода определения твердости зависит от величины твердости материала образца (детали), его размеров, толщины измеряемого на твердость слоя и т.п.

В зависимости от скорости приложения нагрузки способы определения твердости делятся на статические и динамические, а по способу ее приложения – на методы вдавливания и царапания. Наиболее распространены методы определения твердости, в которых используется статическое вдавливание индентора нормально поверхности образца.

Во всех методах испытания на твердость необходимо правильно подготовить поверхность образца. Последний должен по возможности полно характеризовать тот материал, твердость которого необходимо определить. Все поверхностные дефекты (окалина, выбоины, вмятины, грубые риски и т.д.) удаляются. Требования к качеству испытываемой поверхности зависят от применяемого индентора и величины прилагаемой нагрузки. Чем меньше глубина вдавливания индентора, тем выше должна быть чистота поверхности и тем более строго нужно

следить за тем, чтобы свойства поверхностного слоя не исказились за счет наклепа или нагрева при шлифовании и полировке.

Нагрузка должна прилагаться по оси вдавливаемого индентора перпендикулярно к испытываемой поверхности. Для этого плоскость испытываемой поверхности образца укрепляется строго параллельно опорной поверхности. Неплоские образцы крепятся на специальных опорных столиках, входящих в комплект твердомеров.

Результаты испытаний на твердость зависят от времени приложения нагрузки к вдавливаемому индентору и времени выдержки под нагрузкой. При постоянной нагрузке линейный размер отпечатка  $d = b \tau^n$ , где  $\tau$  – время выдержки индентора под нагрузкой;  $b$  и  $n$  – коэффициенты, зависящие от свойств материала и величины  $P$ . В зависимости от  $\tau$  различают кратковременную и длительную твердость. В стандартных методах кратковременную твердость определяют при комнатной температуре. Здесь обычно  $\tau = 10-15$  с. Длительная твердость, как правило, оценивается при повышенных температурах, где она может использоваться как характеристика жаропрочности материала.

При определении твердости измеряется суммарное сопротивление металла внедрению в него индентора, усредняющее твердость всех имеющихся структурных составляющих. Поэтому полученный после снятия нагрузки отпечаток должен быть по размеру значительно больше размеров зерен отдельных структурных составляющих (диаметр или длина диагонали отпечатков при измерении твердости колеблется от 0,1-0,2 до нескольких миллиметров). Неизбежные различия в структуре разных участков образца приводят к разбросу значений твердости, который тем больше, чем меньше размер отпечатка. Для получения достоверных средних значений твердости на каждом образце приходится делать по несколько замеров, и рассчитывать среднее арифметическое.

Числа твердости, полученные разными методами, связаны между собой. Зная, например, значение твердости по Бринеллю, можно перевести его с некоторым приближением в число твердости по Виккерсу или Роквеллу. Приближенный пересчет чисел твердости производится с помощью Приложения 1.

## 2.1 Твердость по Бринеллю (ГОСТ 9012-59)

При измерении твердости по Бринеллю стальной или твердосплавный шарик диаметром  $D$  (мм) вдавливается в испытываемый образец под нагрузкой  $P$  (кгс), приложенной в течение определенного времени, и после снятия нагрузки измеряется диаметр  $d$  (мм) оставшегося на поверхности образца отпечатка (рис. 3.1).

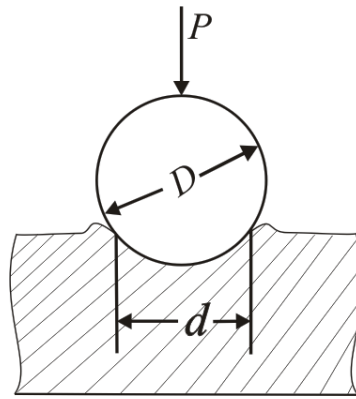


Рис. 3.1. Схема измерения твердости по Бринеллю

Число твердости  $HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$ , где величина  $\frac{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}$  определяет площадь  $F$  шаровой поверхности отпечатка. Величину  $F$  можно рассчитать и по глубине  $t$  вдавливания индентора:  $F = \pi D t$ .

После преобразования расчетной формулы для определения числа твердости получаем:

$$HB = \frac{P}{D^2} \left[ \frac{2/\pi}{1 - \sqrt{1 - (d/D)^2}} \right].$$

Отсюда следует, что для получения одинаковых значений  $HB$  одного и того же образца при использовании шариков разного диаметра необходимо постоянство отношений  $P/D^2$  и  $d/D$ . С помощью Приложения 2 (табл. П.2) по измеренной величине  $d$  и известным  $P$  и  $D$  прямо находят значение  $HB$ .

При определении твердости по Бринеллю используют шаровые инденторы одного из пяти диаметров – 1; 2; 2,5; 5 или 10 мм. Они изготавливаются из стали или твердого сплава с твердостью по Виккерсу не менее 850 HV и 1500 HV соответственно.

Число твердости по Бринеллю записывается без размерности (кгс/мм<sup>2</sup>). При определении твердости стальным шариком диаметром 10 мм при усилии 3000 кгс и продолжительности выдержки от 10 до 15 с твердость по Бринеллю обозначают, например, так: 225  $HB$  или 87,5  $HB$ . При других условиях испытания после символа  $HB$  указывают диаметр шарика, значение приложенного усилия (в кгс), продолжительность выдержки, если она отличается от 10-15 с. Например, 250  $HB$  5/750/30 – твердость по Бринеллю 250, определенная при вдавливании



стального шарика диаметром 5 мм, при усилии 750 кгс и продолжительности выдержки 30 с. В случае использования шарика из твердого сплава твердость обозначают символом *HBW*.

С помощью метода Бринелля можно испытывать материалы с твердостью *HB* от 3 до 650. При большей твердости образца шарик-индентор остаточно деформируется на величину, превышающую стандартизированный допуск.

Минимальная толщина испытуемого образца должна быть не меньше 10 – кратной глубины отпечатка. При известной *HB* примерная глубина отпечатка  $t = \frac{P}{\pi D \cdot HB}$ . Поверхность образца должна быть отшлифована так, чтобы края отпечатка были достаточно отчетливы для измерения его диаметра с требуемой точностью (0,01-0,05 мм). Эти измерения проводят либо на инструментальных микроскопах, либо с помощью измерительной лупы. Диаметр отпечатка измеряется в двух взаимно перпендикулярных направлениях и определяется как среднее арифметическое из двух измерений. Величина *d* обычно весьма велика (несколько мм) по сравнению с размерами отпечатков в других методах определения твердости. Это позволяет получать достоверные средние значения *HB* по 3-5 отпечаткам. Расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее  $2,5d$ , а расстояние между центрами двух соседних отпечатков – не менее  $4d$  (для металлов с  $HB < 35$ , соответственно,  $3d$  и  $6d$ ).

Постоянство отношения  $d/D$  является условием геометрического подобия отпечатков при использовании шарового индентора. Однако на практике такого постоянства добиться невозможно. Отношение  $d/D$  поддерживают в пределах 0,2-0,6. Для получения отпечатков оптимального размера необходимо правильно подобрать соотношение между нагрузкой и диаметром шарика. В зависимости от твердости материала величина  $P/D^2$  по ГОСТ 9012-59 должна быть равна 30 ( $HB > 140$ ), 10 ( $HB = 35-140$ ) или 5 ( $HB < 35$ ).

Отсутствие геометрического подобия отпечатков при определении твердости по Бринеллю разных материалов является существенным недостатком метода, делает невозможным строгие количественные сопоставления чисел твердости, полученных при неодинаковых  $d/D$ . Для устранения этого недостатка могут быть использованы другие методы расчета числа твердости по диаметру или глубине вдавливания шарового индентора. В частности, предложено определять число твердости как  $H_D = \frac{P - P_s}{\pi D t}$ , где  $P_s$  – нагрузка, при которой начинается пластическая деформация в центре отпечатка. Величина  $P_s$  определяется пределом текучести материала образца и его упругими свойствами, а также зависит от  $D$ . Экспериментально величину  $P_s$  можно оценить, экстраполируя зависимость глубины вдавливания шарика  $t$  от нагрузки  $P$  до пересечения с осью нагрузок (рис. 3.2). Число твердости

$H_D$  практически не зависит от  $P/D^2$  и  $d/D$ . Однако большая трудоемкость его определения до сих пор делает его при массовых испытаниях неконкурентоспособным по сравнению со стандартным числом твердости по Бринеллю.

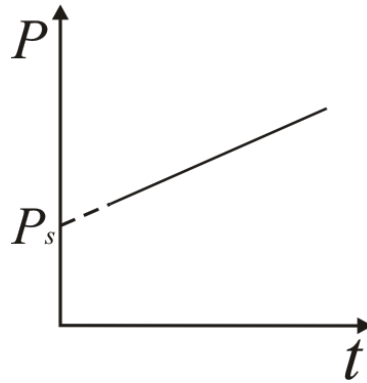


Рис. 3.2. Зависимость глубины вдавливания шарового индентора  $t$  от нагрузки  $P$

### ***Приборы для измерения твердости по Бринеллю***

Для измерения твердости по Бринеллю используют приборы с механическим приводом. Существующие твердомеры Бринелля объединяют следующие основные механизмы: 1) рычажная система для передачи усилия от набора грузов индентору; 2) механизм подъема и опускания основного рычага; 3) подъемный винт со столом для образца и 4) система задания и регулировки времени выдержки образца под нагрузкой. На рис. 3.3 приведена схема твердомера Бринелля.

Прибор смонтирован в массивной станине 7. На подъемном винте 5, перемещающемся при вращении маховика 6, установлен опорный столик 4, на котором устанавливается испытуемый образец. В верхней части станины имеется шпиндель 2, в который вставляются сменные наконечники 3 с шариками разных диаметров. Шпиндель опирается на пружину 1, предназначенную для приложения к образцу предварительной нагрузки для устранения смещений образца во время испытания. Основная нагрузка прилагается через систему рычагов. На длинном плече основного рычага 12 имеется подвеска 11, на которую накладываются сменные грузы 9. Комбинацией грузов можно задать следующие нагрузки: 187,5; 250; 500; 750; 1000 и 3000 кгс. Вращение вала электродвигателя 8 посредством червячной передачи сообщается шатуну 10, при опускании которого нагрузка передается на шпиндель прибора с установленным шаровым индентором 3. Продолжительность испытания задается передвижным упором. Когда шатун 10 доходит до него, срабатывает концевой переключатель и электродвигатель начинает вращаться в обратную сторону, вследствие чего шатун вновь

поднимается и нагрузка снимается со шпинделя. По возвращении шатуна в исходное положение электродвигатель автоматически выключается.

Используемая в твердомере рычажная система передачи усилий от грузов к испытательному наконечнику (индентору) аналогична тем, которые применяются в приборах для измерения твердости по методам Виккерса и Роквелла (см. пп. 2.2 и 2.3).

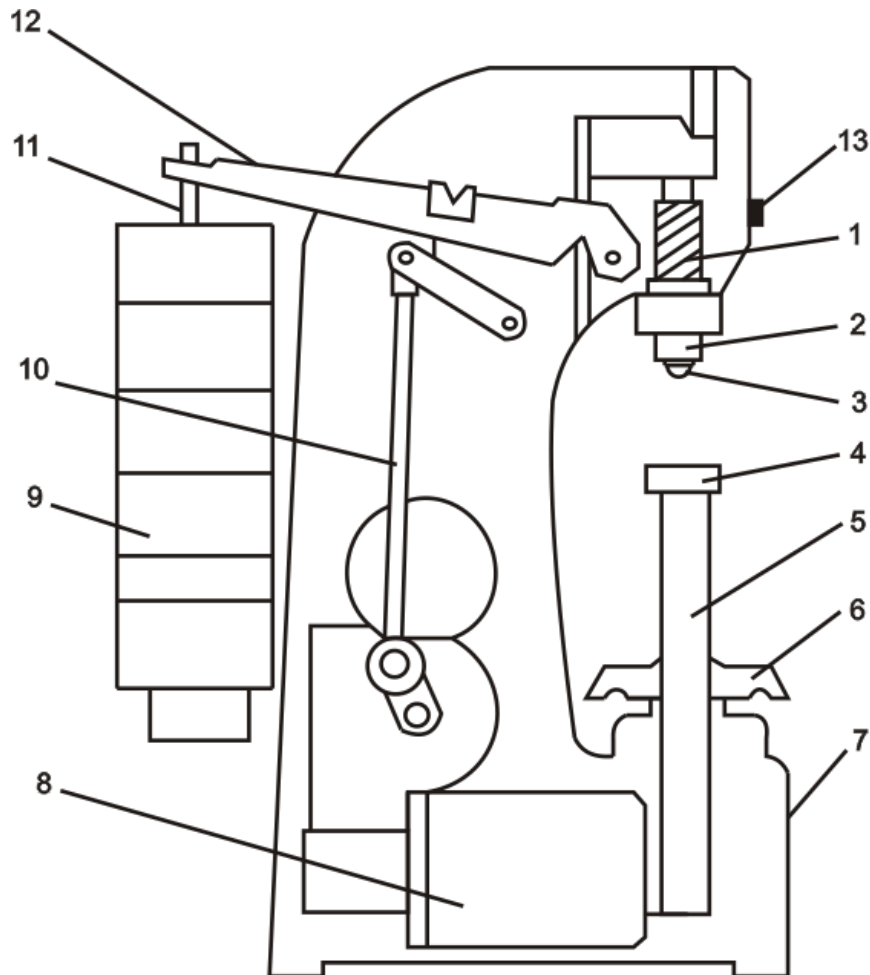


Рис. 3.3. Схема прибора ТШ-2 для измерения твердости по Бринеллю:

- 1 – пружина; 2 – шпиндель; 3 – шаровой индентор; 4 – опорный столик; 5 – подъемный винт;  
6 – маховик; 7 – станина; 8 – электродвигатель; 9 – сменные грузы; 10 – шатун; 11 – подвеска;  
12 – основной рычаг; 13 – сигнальная лампа

Порядок работы на приборе следующий. Сначала выбирают диаметр шарика и величину нагрузки в зависимости от материала и размера образца. Если ориентировочно твердость испытуемого материала известна, то нагрузку и диаметр шарика выбирают, как уже отмечалось, пользуясь соотношением  $P/D^2 = 30$  при  $HB > 140$ ;  $P/D^2 = 10$  при  $HB = 35-140$  и  $P/D^2 = 5$  при  $HB < 35$ . Если ориентировочная твердость образца неизвестна, то производят

пробный отпечаток при любом из перечисленных соотношений  $P/D^2$ . Затем вычисляют отношение  $d/D$ , которое для сохранения закона подобия должно быть в пределах 0,2-0,6. В противном случае изменяют нагрузку и диаметр шарика так, чтобы для указанных соотношений  $P/D^2$  получалось необходимое отношение  $d/D$ .

Наконечник с нужным шариком закрепляют в шпинделе установочным винтом. На подвеску накладывают требуемое количество сменных грузов. При установке сменных грузов необходимо учитывать, что подвеска 11 (рис. 3.3) без грузов обеспечивает минимальную нагрузку на образец 187,5 кгс. Необходимые значения усилий достигаются набором грузов, промаркированных условными весами: 62,5; 250 и 500 кгс.

Затем испытуемый образец устанавливают на столик 4 (рис. 3.3) и, вращая маховик, поднимают и прижимают образец к шаровому индентору до упора в ограничительный конус. Нажав кнопку-выключатель, приводят в движение электродвигатель. По окончании испытания вращением маховика в обратную сторону опускают столик, снимают образец, измеряют диаметр полученного отпечатка и по табл. П.2 определяют число твердости. Используя Приложение 2 (табл. П.2) необходимо помнить, что если  $D = 5$  мм, полученный  $d_5$  надо удваивать, а если  $D = 2,5$  мм, то учетверять. Например, если  $P = 250$  кгс,  $D = 5$  мм ( $P = 10D^2$ ) и  $d_5 = 2$  мм, то 763 *HB*; если  $P = 187,5$  кгс,  $D = 2,5$  мм ( $P = 30D^2$ ) и  $d_{2,5} = 1,1$  мм, то 187 *HB*.

Правильность работы прибора проверяется по двум параметрам – времени выдержки образца под нагрузкой и соответствию нагрузок на индентор заданным в паспорте прибора номинальным значениям (187,5; 250; 500; 750; 1000 и 3000 кгс).

Время выдержки образца под нагрузкой определяется по времени горения сигнальной лампы 13. Для цветных металлов и сплавов это время должно составлять от 10 до 30 с, для черных металлов выдержка 10 с.

Задатчик времени выдержки под нагрузкой находится с правой стороны прибора ТШ-2. Он состоит из шкалы, закрепленной на станине прибора, чашеобразного диска внутри этой шкалы, и стопорного винта, ввинченного в общую ось. На шкале, прикрепленной к станине, нанесены справочные данные о значениях твердости, которые могут изменяться при разных комбинациях нагрузок и диаметров шариков. Чашеобразный диск вращается во время испытаний. На нем имеются три отметки, соответствующие выдержкам 10, 30 и 60 с. Для установки необходимой выдержки надо отвернуть стопорный винт и установить отметку с заданным значением выдержки в положение, примерно соответствующее отметке 9 ч на часовом циферблате. Затем следует затянуть стопорный винт и проверить по секундомеру установленную выдержку. На чашеобразном диске между основными отметками нанесены корректировочные риски. Смещение диска по часовой стрелке или против нее на одну

корректировочную риску относительно исходного положения соответственно уменьшает или увеличивает на 1 с выдержку под нагрузкой.

Соответствие нагрузок на образец паспортным значениям определяется с помощью динамометра.

Проверка правильности показаний твердомера производится с помощью стальных контрольных плиток с известной твердостью – эталонных мер твердости. Если полученное значение твердости отличается от истинной твердости контрольной плитки более чем на 4-5 %, прибор считается не откалиброванным. В этом случае необходимо проверить величину нагрузки на индентор с помощью образцового динамометра третьего разряда типа ДОСМ. Проверка производится с использованием шарика диаметром 10 мм. Динамометр устанавливается вместо образца, прибор включается как при определении твердости. Погрешность нагрузки должна быть  $\pm 1$  %. Этой точности добиваются перемещением регулировочного груза по основному рычагу 12 (рис. 3.3)

## 2.2 Твердость по Виккерсу (ГОСТ 2999-75)

При измерении твердости по Виккерсу в поверхность образца вдавливается алмазный индентор в форме четырехгранной пирамиды с углом при вершине  $\alpha = 136^\circ$ . После удаления нагрузки  $P$ , действовавшей определенное время (10-15 с) измеряется диагональ отпечатка  $d$ , оставшегося на поверхности образца (рис. 3.4). Число твердости  $HV$  определяют отношением нагрузки (в кгс) к площади боковой поверхности полученного пирамидального отпечатка ( $\text{мм}^2$ ):

$$HV = P / F = P / \left( \frac{d^2}{2} \cdot \frac{1}{\sin(\alpha/2)} \right) = \frac{2P \cdot \sin(\alpha/2)}{d^2} = 1,854 \frac{P}{d^2}, \text{ кгс/мм}^2.$$

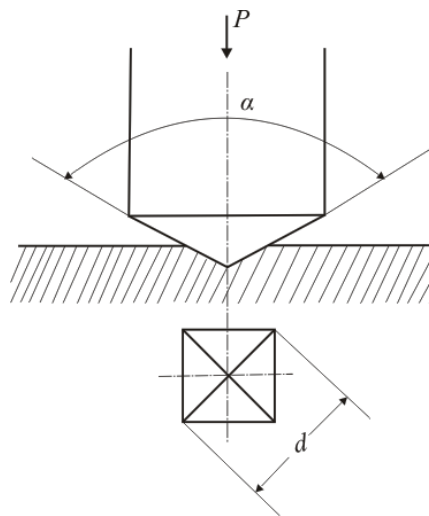


Рис. 3.4. Схема измерения твердости по Виккерсу

В Приложении 3 (табл. П.3) приведены значения  $HV$ , вычисленные по этой формуле для различных значений  $d$  и нагрузки 10 кгс. Числа твердости для других нагрузок легко получить, используя прямую пропорциональность между  $HV$  и  $P$ . Например,  $HV$  при заданном  $d$  и  $P = 10$  кгс в десять раз больше, чем при  $P = 1$  кгс.

Твердость по Виккерсу при условиях испытания  $P = 30$  кгс и времени выдержки под нагрузкой 10-15 с обозначается цифрами, характеризующими величину твердости, и буквами  $HV$ , например, 500  $HV$ . При других условиях испытания после букв  $HV$  указывается нагрузка и время выдержки. Пример обозначения: 220  $HV$  10/30 – твердость по Виккерсу, полученная при нагрузке 10 кгс и времени выдержки 30 с.

Относительно небольшие нагрузки и малая глубина вдавливания индентора обуславливают необходимость более тщательной подготовки поверхности, чем в случае измерения твердости по Бринеллю. Образцы для измерения твердости  $HV$  должны быть, как правило, отполированы и их поверхность должна быть свободна от наклепа.

Минимальная толщина испытуемого образца должна быть больше диагонали отпечатка в 1,2 (для сталей) или в 1,5 раза (для цветных металлов и сплавов). Расстояние между центром отпечатка и краем образца или краем соседнего отпечатка должна быть не менее 2,5 длины диагонали отпечатка.

При использовании в качестве индентора пирамиды отпечатки во всех случаях получаются геометрически подобными и число твердости  $HV$  не зависит от нагрузки. Это важное преимущество метода Виккерса, делающее его более строгим по сравнению с методом Бринелля. Благодаря алмазному индентору  $HV$  можно определять практически на любых материалах, вне зависимости от их твердости. Важно также, что вплоть до 400  $HV$  числа твердости по Виккерсу и Бринеллю близки по абсолютной величине.

Длина диагонали отпечатка обычно меньше 1 мм, т.е. размеры отпечатка при определении твердости по Виккерсу, как правило, значительно меньше, чем в методе Бринелля. При грубой структуре образца это может вызвать большой разброс значений  $HV$  в разных точках образца по сравнению с разбросом  $HB$ . Для получения достоверных средних значений приходится делать на каждом образце не менее 5 замеров.

### ***Приборы для измерения твердости по Виккерсу***

Существуют разные конструкции приборов для определения твердости по Виккерсу. При многообразии конструктивных решений всех их объединяют общие основные механизмы: 1) рычажная система, передающая усилия от набора грузов индентору; 2) механическая или

электромеханическая система подъема и опускания основного рычага; 3) подъемный винт со столом для образца; 4) измерительный микроскоп 5) поворотное устройство, обеспечивающее установку над образцом индентора или микроскопа; 6) устройство регулирования времени нагружения.

Внешний вид прибора для измерения твердости по Виккерсу марки ИТ 5010 представлена на рис. 3.5. Прибор смонтирован на массивной станине 4. Образец устанавливают на опорный столик 6 и включают выключатель 2 осветителя 11. Далее на экране измерительной головки 9 выбирают место на образце, твердость которого необходимо измерить. Изображение на экране формируется с помощью объектива 7. Наводка на резкость производится вращением маховика 5. После этого отводят рукоятку 12 вправо и выводят ее из зацепления. В результате испытательный наконечник 8 становится перпендикулярно поверхности образца и внедряется в него под действием нагрузки. Схема нагружения аналогична той, что применяется в твердомере Бринелля (см. рис. 3.3). В момент приложения нагрузки загорается сигнальная лампа 3 и включается реле времени. Продолжительность выдержки под нагрузкой регулируется в пределах 10-30 с помощью задатчика 1. После снятия нагрузки рукоятку вновь вводят в зацепление, при этом полученный отпечаток снова оказывается в поле зрения объектива 7. Медленным вращением маховика добиваются резкого изображения отпечатка. Затем с помощью измерительной головки и микрометрического винта 10 определяют длину диагонали отпечатка, проецируемого на экран измерительной головки.

Схема измерения показана на рис. 3.6. Вращением левого микрометрического винта 1 подводят ближайшее большое деление прозрачной шкалы до совмещения с левым углом проекции отпечатка. Вращением правого микрометрического винта 2 подводят ближайшее большое деление матовой шкалы до совмещения с правым углом проекции отпечатка. Далее отсчитывают длину диагонали отпечатка. Число больших делений, заключенных между углами проекции отпечатка, дает число десятых долей миллиметра, число делений нониуса матовой шкалы, заключенных между нулевыми делениями шкал, дает число сотых долей миллиметра, а число делений на барабане правого микрометрического винта дает число тысячных долей миллиметра. Аналогично измеряется длина второй диагонали отпечатка, для этого измерительная головка поворачивается на угол  $90^\circ$ .

Проверка твердомеров Виккерса производится по контрольным плиткам, так же как и твердомеров Бринелля.

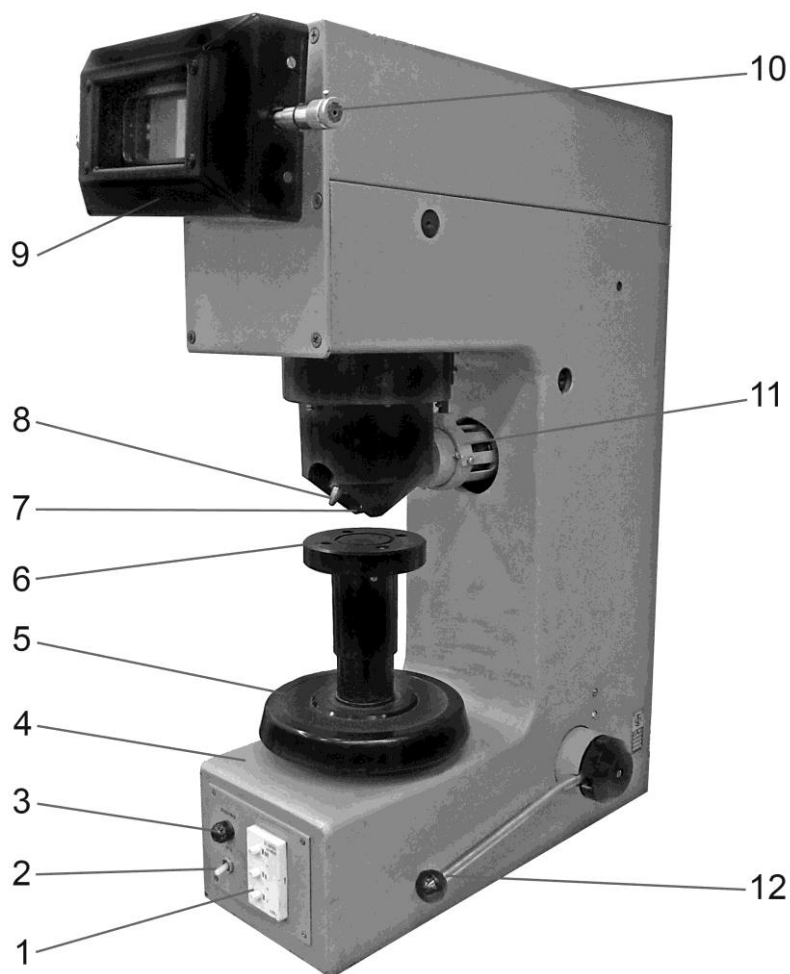


Рис. 3.5. Внешний вид прибора марки ИТ 5010 для измерения твердости по Виккерсу:  
 1 – задатчик времени выдержки под нагрузкой; 2 – выключатель осветителя; 3 – сигнальная  
 лампа; 4 – станина; 5 – маховик; 6 – опорный столик; 7 – объектив;  
 8 – испытательный наконечник; 9 – измерительная головка; 10 – винт микрометрический;  
 11 – осветитель; 12 – рукоятка.

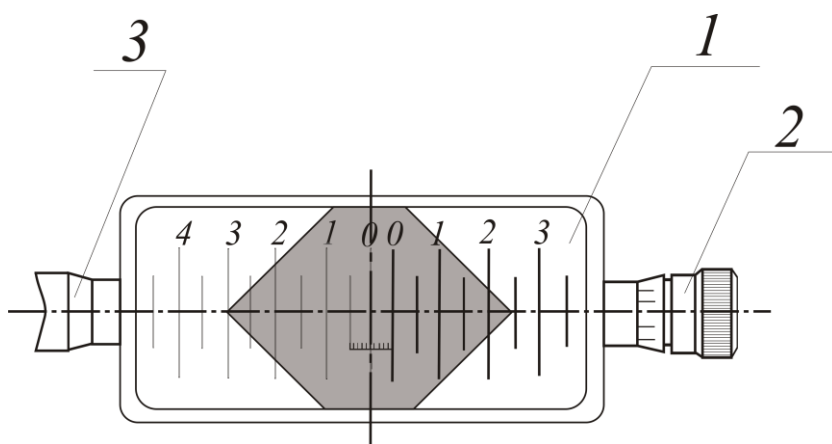


Рис. 3.6. Измерительное устройство и схема измерения длины диагонали отпечатка:



1 – рамка измерительная; 2 – винт микрометрический; 3 – винт

### 2.3 Твердость по Роквеллу (ГОСТ 9013-59)

При измерении твердости по Роквеллу индентор – алмазный конус с углом  $120^\circ$  и радиусом закругления 0,2 мм или стальной шарик диаметром 1,5875 мм (1/16 дюйма) вдавливается в образец под действием двух последовательно прикладываемых нагрузок – предварительной  $P_0$  и общей  $P = P_0 + P_1$ , где  $P_1$  – основная нагрузка. Число твердости по Роквеллу измеряется в условных единицах и зависит от глубины вдавливания индентора под определенной нагрузкой.

Определение твердости по Роквеллу при вдавливании алмазного конуса заключается в следующем (рис. 3.7). Сначала индентор вдавливается в поверхность образца под предварительной нагрузкой  $P_0 = 10$  кгс, которая не снимается до конца испытания. Под нагрузкой  $P_0$  индентор погружается в образец на глубину  $h_0$ . Затем на образец подается полная нагрузка  $P = P_0 + P_1$  и глубина вдавливания индентора увеличивается. Глубина вдавливания  $h$  после снятия основной нагрузки  $P_1$ , когда на индентор вновь действует только предварительная нагрузка  $P_0$ , определяет число твердости по Роквеллу ( $HR$ ). Чем больше глубина вдавливания  $h$ , тем меньше число твердости  $HR$ .

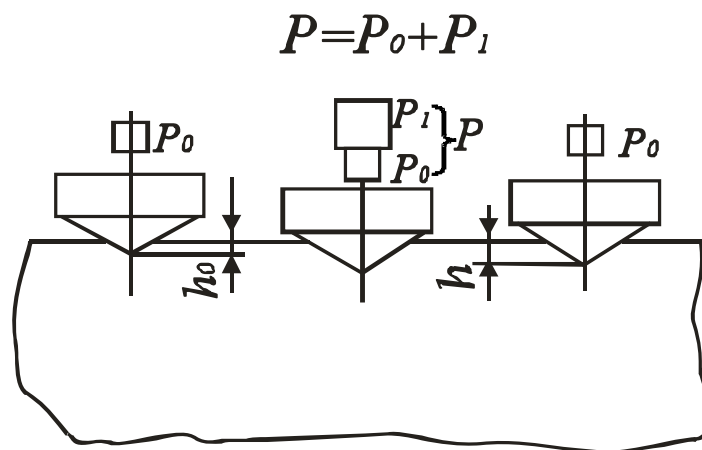


Рис. 3.7. Схема измерения твердости по Роквеллу

При использовании в качестве индентора алмазного конуса твердость по Роквеллу чаще всего определяют по двум «шкалам» –  $A$  и  $C$ . При измерении по шкале  $A$ :  $P_0 = 10$  кгс,  $P_1 = 50$  кгс,  $P = 60$  кгс; по шкале  $C$ :  $P_0 = 10$  кгс,  $P_1 = 140$  кгс,  $P = 150$  кгс. Число твердости здесь определяется по формуле  $HRC$  (или  $HRA$ )  $= 100 - e$ , где  $e = \frac{h - h_0}{0,002}$  (0,002 мм – цена деления

шкалы твердомера Роквелла, а 100 – максимальное число делений, на которое возможно перемещение стрелки при измерении конусом).

При использовании в качестве индентора стального шарика число твердости *HRB* определяют по шкале *B*, то есть при  $P_0 = 10$  кгс и  $P_1 = 90$  кгс  $P = 100$  кгс. Здесь  $HRB = 130 - e$ , т.к. при задании предварительной нагрузки для шарика за нулевое деление принимают точку 30.

Таким образом, твердость по Роквеллу обозначают символом *HR* с указанием шкалы твердости (*A*, *B*, *C* и др., более редко используемые), которому предшествует числовое значение твердости из трех значащих цифр. Например: 61,5 *HRC* – твердость по Роквеллу 61,5 единиц по шкале *C*.

Установлены следующие диапазоны измерений твердости по указанным шкалам: по шкале *A* – 20-88, шкале *B* – 20-100, *C* – 20-70 единиц.

Требования к поверхности образцов для измерения твердости по Роквеллу примерно такие же, как и при определении твердости по Виккерсу. Расстояние между центрами двух соседних отпечатков или от центра какого-либо отпечатка до края образца должно быть не менее 3 мм. Минимальная толщина образцов при определении твердости по разным шкалам указана в Приложении 4 (табл. П4). Эта толщина должна не менее чем в 10 раз превышать глубину вдавливания *h*. Измерение твердости по Роквеллу может производиться на цилиндрических и сферических поверхностях с учетом специальных поправок.

Из рассмотрения методики определения твердости по Роквеллу видно, что это еще более условная характеристика, чем НВ. Наличие различных шкал твердости, определяемой без геометрического подобия отпечатков, условный и безразмерный численный результат испытания, сравнительно низкая чувствительность делают метод Роквелла лишь средством быстрого упрощенного технического контроля. В заводских условиях его ценность велика именно благодаря этой простоте, высокой производительности, отсчету числа твердости прямо по шкале прибора, возможности полной автоматизации испытания.

### ***Приборы для измерения твердости по Роквеллу***

Существует несколько конструкций приборов для измерения твердости по Роквеллу. Все они имеют следующие основные механизмы: 1) рычажная система передачи усилий от грузов к индентору; 2) механизм подъема и опускания основного рычага; 3) подъемный винт со столом для образцов; 4) индикатор замера глубины отпечатка; 5) устройство регулирования времени нагружения. На рис. 3.8 приведен внешний вид прибора ТР 5006.

Как и в ранее рассмотренных твердомерах, передача усилий к испытательному наконечнику 4 происходит посредством рычажной системы. Подъем и опускание рычагов с грузами осуществляется рукояткой 7. В верхней части прибора имеется цифровой индикатор 5 для замера глубины отпечатка.

Порядок работы на приборе следующий. В зависимости от материала образца выбирают и устанавливают индентор 4 (алмазный конус или шарик) и необходимую нагрузку (шкалу твердости) переключателем 6. Образец устанавливают на столик 3 и плавно вращают маховик 2 до тех пор, пока индентор не окажется вдавленным в образец предварительной нагрузкой  $P_0 = 10$  кгс. Этот момент будет достигнут, когда большая стрелка индикатора 5 совместится с нулем, а малая – с черной риской. Точную установку нуля производят вращением ручки на передней панели прибора. После этого нажимают рукоятку 7 и прибор автоматически в течение 3-6 с производит нагружение. Через 1-3 с после остановки большой стрелки снимают нагрузку, затем плавно переводят рукоятку в начальное положение и считывают число твердости.

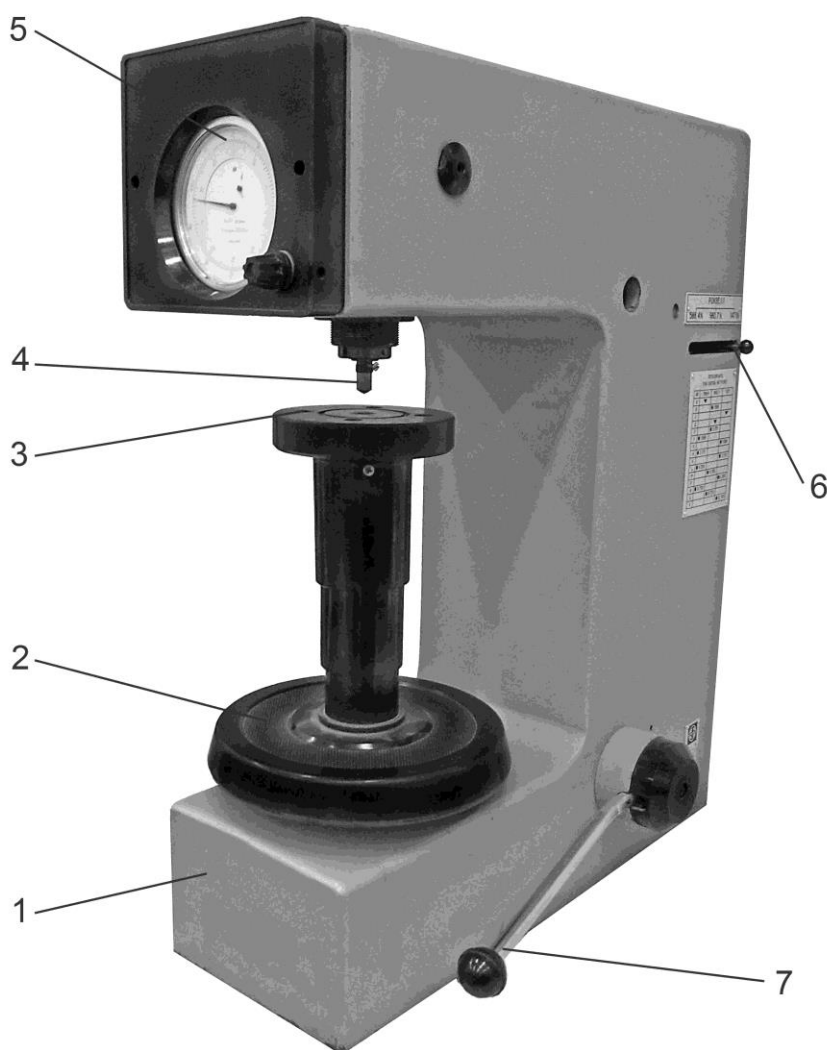


Рис. 3.8. Внешний вид прибора типа TP 5006 для измерения твердости по Роквеллу:

1 – станина; 2 – маховик; 3 – столик; 4 – испытательный наконечник; 5 – цифровой индикатор;  
6 – переключатель нагрузки; 7 – рукоятка.

Для определения твердости по Роквеллу тонких образцов или слоев используют специальный прибор – Супер-Роквелл. Он отличается от обычных твердомеров меньшей величиной прилагаемой нагрузки и более точным индикатором. Предварительная нагрузка у этого прибора составляет 3 кгс, а общая – 15, 30 или 45 кгс. Одно деление индикатора здесь соответствует глубине вдавливания 0,001 мм. Супер-Роквелл используют для оценки твердости тонких листов, очень малых образцов, поверхностных слоев, изделий, которые могут разрушаться под действием большой нагрузки.

Проверка твердомеров производится по эталонным мерам твердости, как и приборов для измерения *HB* и *HV*.

## 2.4 Универсальные твердомеры

Помимо специализированных твердомеров в настоящее время широко распространены твердомеры универсальные, предназначенные для определения твердости по Виккерсу, Бринеллю и Роквеллу. Современные модели отличаются простотой в управлении и, что особенно характерно, автоматизацией испытания. На рис. 3.9 приведен внешний вид универсального цифрового твердомера модели 930 фирмы Wolpert (Нидерланды).

Отличительной особенностью этого прибора является наличие пульта управления 3, состоящего из клавиатуры и дисплея, на котором выводится информация по процедуре и результатам испытания. С помощью пульта управления можно задавать различные параметры испытания (метод, нагрузка, время выдержки и др.), сохраняя их в отдельные программы. Цифровой штангенциркуль 2 предназначен для автоматического определения размеров отпечатка.

После включения твердомера штангенциркуль смыкают в нулевое положение и нажимают специальную клавишу, находящейся над ручкой раскрытия штангенциркуля. Далее на пульте управления выбирают метод определения твердости путем нажатия соответствующей кнопки, а также программу испытания. Там же нажатием кнопки «LIGHT» включают осветитель 8 для проецирования поверхности образца на экран 6. Сам образец устанавливают на испытательном столике 3 и, вращая маховик 10, поднимают винтовой шпиндель 2 до тех пор, пока поверхность образца не окажется резко сфокусированной на экране прибора. Для поддержания расстояния между объективом 9 и образцом и для защиты объектива от повреждений предусмотрено зажимное устройство 4. Начинают испытание путем нажатия

клавиши «START» на пульте управления 7. Далее индентор 9 автоматически устанавливается в рабочее положение и производится нагружение. В случае определения твердости по методу Роквелла, непосредственно в конце процедуры испытания значение твердости отображается в цифровом виде на дисплее пульта управления. В случае измерения по Виккерсу или Бринеллю после заданного времени выдержки нагрузка снимается и индентор возвращается в исходное состояние – объектив устанавливается над образцом, при этом на экране 6 отображается проекция отпечатка. Затем с помощью штангенциркуля проводят измерение длин двух диагоналей (или диаметров) отпечатка. Для этого перемещают измерительные метки штангенциркуля в два противоположных угла отпечатка таким образом, чтобы они располагались в точности под прямым углом к подлежащей измерению диагонали. Затем нажимают на клавишу подтверждения на штангенциркуле. Эту же процедуру повторяют для измерения второй диагонали. После завершения процедуры измерения значение твердости отображается на пульте управления. В приборе имеется возможность проводить серии измерений, для чего осуществляется автоматический расчет среднего арифметического значения и погрешности.

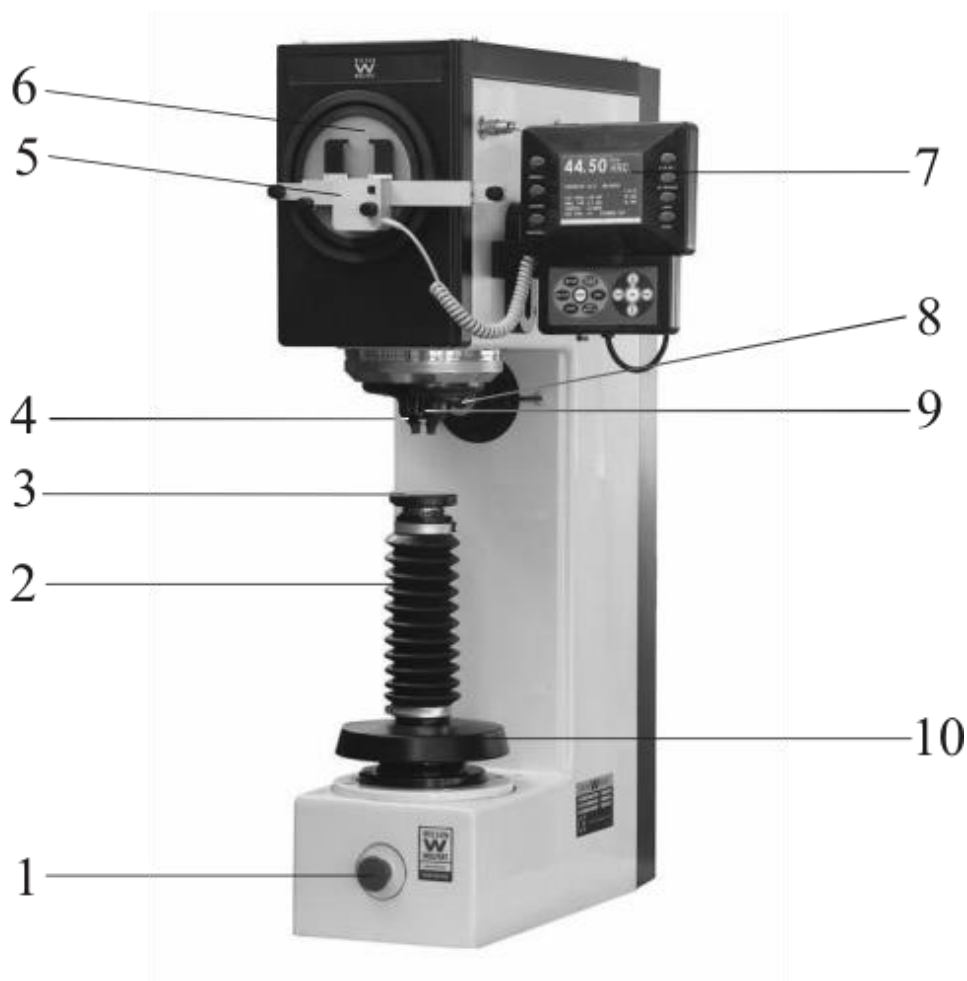


Рис. 3.9. Внешний вид универсального твердомера модели 930 фирмы Wolpert:

1 – аварийный выключатель; 2 – винтовой шпиндель; 3 – испытательный столик; 4 – зажимное устройство; 5 – цифровой штангенциркуль; 6 – экран; 7 – пульт управления; 8 – осветитель; 9 – поворачивающийся блок с индентором и объективом; 10 – маховик.

### 3. Задание по работе

1. Ознакомиться с устройством твердомера ТШ-2 и порядком работы на нем. Измерить твердость образца сплавов алюминия с 3, 6, 8, 10, 12 и 14 % магния в закаленном (440 °С, 4 ч) состоянии, предварительно подобрав диаметр шарового индентора и величину нагрузки (на каждом образце делать по три отпечатка). Построить зависимость *HB* от содержания магния в алюминиевом твердом растворе.

2. Ознакомиться с устройством твердомера ИТ 5010 и освоить методику работы на нем. Построить зависимость твердости по Виккерсу от концентрации магния в алюминиевом твердом растворе на образцах сплавов алюминия с 3, 6, 8, 10, 12 и 14% магния. На каждом образце ставить по пять отпечатков. Рассчитать среднеквадратичную ошибку определения *HV*.

3. Ознакомиться с конструкцией и работой на приборах типа ТР 5006. Построить зависимость *HRA* и *HRC* мартенсита от содержания углерода (по результатам измерения твердости закаленных сталей с разной концентрацией углерода).

### 4. Требования к отчету

В отчете по работе должны быть представлены результаты всех экспериментов. Порядок оформления записей в лабораторной тетради см. в описании к лабораторной работе 1.

### 5. Литература

1. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. – М: Металлургия, 1998, с. 260-278.

### 6. Контрольные вопросы

1. Каков коэффициент мягкости испытания на твердость?
2. Каким должно быть соотношение размера отпечатка и размеров структурных составляющих при испытаниях на твердость?
3. Какую форму имеет индентор при испытаниях на твердость?

4. Что такое число твердости по Бринеллю?
5. Каков минимальный диаметр шарового индентора при определении твердости по Бринеллю?
6. Каковы условия получения одинаковых значений *HB* при использовании инденторов разного диаметра?
7. Какова размерность чисел твердости по Виккерсу и Бринеллю?
8. Как изменяется величина нагрузки на твердомерах Бринелля?
9. Как рассчитывается число твердости по Виккерсу?
10. Какую форму имеет индентор при определении твердости по Виккерсу и Роквеллу?
11. Чему должна быть равна минимальная толщина медного образца для определения твердости по Виккерсу?
12. Как производится наводка на резкость изображения в измерительном микроскопе твердомера Виккерса?
13. Чему равна предварительная нагрузка при определении твердости по Роквеллу?
14. Чему равна общая нагрузка при определении *HRA*?
15. Чему равна общая нагрузка при определении *HRC*?
16. Что характеризует число твердости по Роквеллу?
17. Какова размерность чисел твердости по Роквеллу?
18. Чему равно число твердости *HRB*?
19. Чем регулируется скорость приложения нагрузки в твердомерах Роквелла?

## Лабораторная работа 4

### ИЗМЕРЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ

(3 часа)

#### 1. Цель работы

Освоение методики определения микротвердости.

#### 2. Теоретическая часть

Метод микротвердости предназначен для определения твердости очень малых (микроскопических) объемов материалов. Он применяется, когда нужно измерить твердость мелких деталей, тонкой проволоки или ленты, тонких поверхностных слоев, покрытий и т.д. Главное его назначение в исследовательских работах – оценка твердости отдельных фаз или структурных составляющих сплавов, а также разница в твердости разных участков этих составляющих.

Метод микротвердости стандартизирован (ГОСТ 9450-76). В качестве индентора при измерении микротвердости чаще всего, как и в случае определения твердости по Виккерсу, используют правильную четырехгранную алмазную пирамиду с углом при вершине  $136^\circ$ . Эта пирамида плавно вдавливается в образец при нагрузках от 0,005 до 0,5 кгс. Число микротвердости  $HV$  определяется по формуле  $HV = 1854 \frac{P}{d^2}$  (кгс/мм<sup>2</sup>), где  $P$  – нагрузка в гс;  $d$  – диагональ отпечатка в мкм;  $\frac{d^2}{1854}$  – площадь боковой поверхности полученного пирамидального отпечатка. Величина  $d$  обычно колеблется в пределах от 7 до 50 мкм. Число микротвердости записывают без размерности с указанием нагрузки в кгс и продолжительности ее приложения (время не указывают, если оно в пределах 10-15 с). Например: 250  $HV$  0,01 – микротвердость, определенная при нагрузке 10 гс;  $HV$  0,1/30 – при нагрузке 100 гс, приложенной в течение 30 с.

Измерение микротвердости производится на специальным образом подготовленных металлографических шлифах. Глубина вдавливания индентора при определении микротвердости  $t = d/7$  измеряется микронами и соизмерима с глубиной получаемого в результате механической шлифовки и полировки наклепанного поверхностного слоя. Поэтому методика тщательного удаления этого слоя имеет здесь особенно важное значение.



Наклепанный слой удаляют обычно одним из трех методов: 1 – электрополировкой; 2 – отжигом (чаще всего вакуумным) готовых шлифов и 3 – глубоким химическим травлением. При использовании любого метода экспериментально устанавливают режим (время электрополировки или травления, плотность тока и концентрацию реактива, температуру и время отжига и т.д.), при котором полностью снимается наклеп в поверхностном слое образца. Для этого строят зависимость  $HV$  от параметра, который изменяется при подборе режима снятия наклепанного слоя (рис. 4.1). Момент выхода на горизонталь величины  $HV$  соответствует оптимальному режиму, который затем используется при подготовке аналогичных образцов.

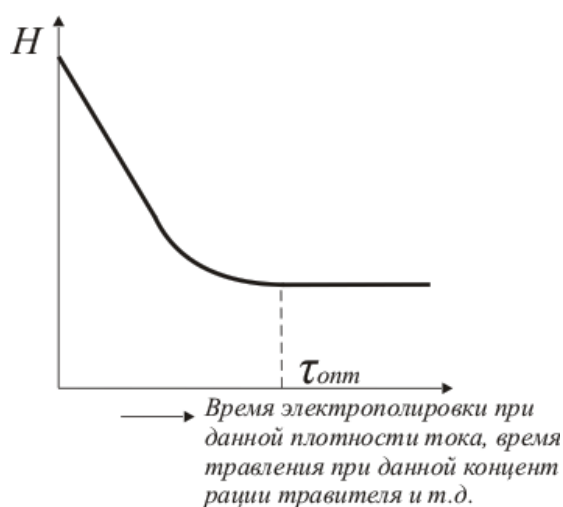


Рис. 4.1. Схема к выбору оптимального режима снятия наклепанного слоя

## 2.1 Прибор для измерения микротвердости

### Устройство прибора

Общий вид прибора для измерения микротвердости марки ПМТ-3 показан на рис. 4.2. На чугунном основании 1 закреплена колонна 5 с резьбой, а на ней – кронштейн с микроскопом и нагружающим устройством. Для установки кронштейна на требуемой высоте служит гайка 6 и стопорный винт (находится за кронштейном, на рис. 4.2 не виден). Микроскоп состоит из тубуса 10, окуляр-микрометра 9, сменного объектива 13 (40-кратного ОЭ-6 с апертурой  $A = 0,65$  и фокусным расстоянием  $F = 23,17$ ) и осветительного устройства 11. Для грубой наводки на резкость микроскоп может перемещаться по высоте относительно кронштейна при помощи винта 8, связанного с реечным устройством. Прежде чем вращать винт 8, необходимо ослабить стопорный винт, расположенный на правой части кронштейна.

Для тонкой наводки на резкость микроскоп перемещают в вертикальном направлении вращением микрометрического винта 7 при затянутом стопорном винте. К нижней части тубуса микроскопа прикреплен механизм нагружения 4. На рис. 4.3 показана его схема. Грузики в виде дисков с прорезями одеваются на стержень 3, в нижнем конце которого крепится оправка с алмазным индентором 2. Стержень подвешен к кронштейну на двух плоских пружинах 6 и 7. При повороте ручки 4 на себя стержень 3 освобождается и перемещается под действием грузов вниз, вдавливая индентор в поверхность образца.

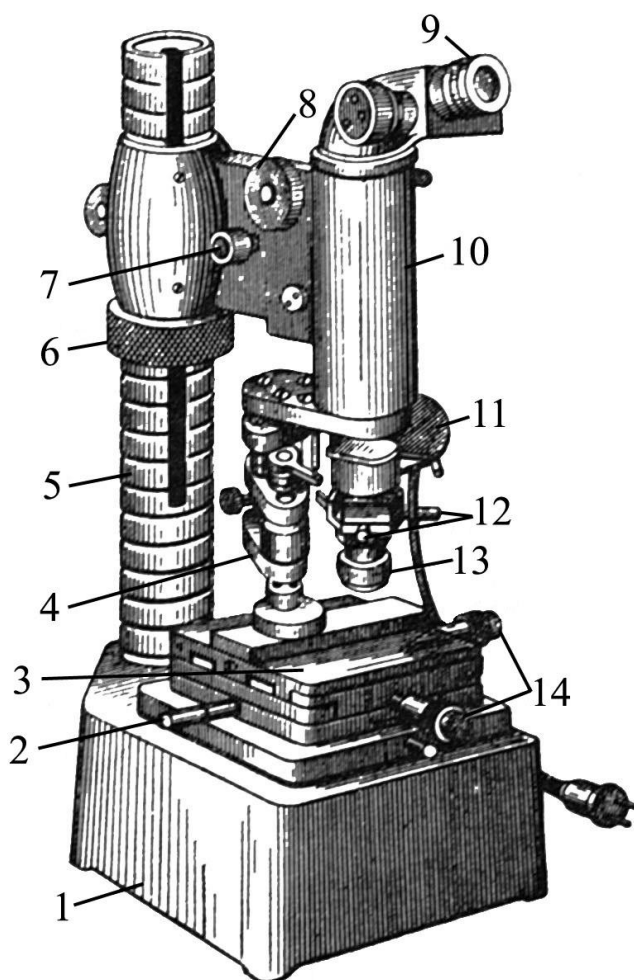


Рис. 4.2. Общий вид прибора ПМТ-3:

1 – чугунное основание; 2 – поворотная рукоятка; 3 – предметный столик; 4 – нагружающий механизм; 5 – колонна с резьбой; 6 – гайка; 7 – микровинт для наводки на резкость; 8 – макровинт для наводки на резкость; 9 – окуляр-микрометр; 10 – тубус микроскопа; 11 – корпус осветителя; 12 – центрировочные винты; 13 – объектив; 14 – микрометрические винты для перемещения столика

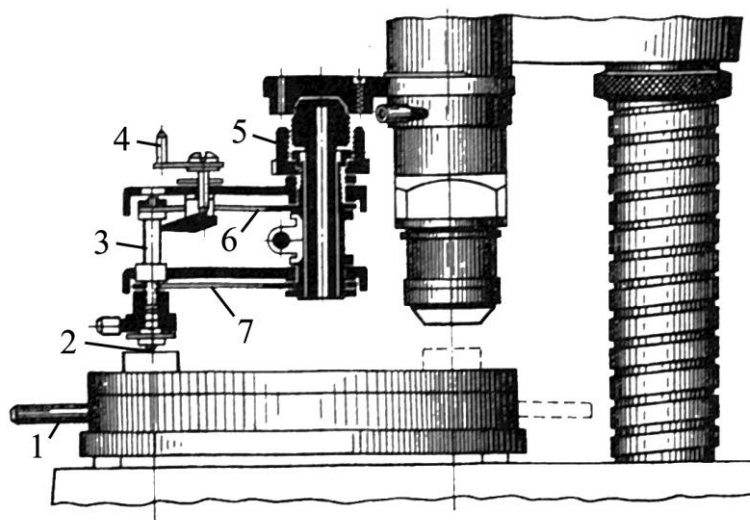


Рис. 4.3. Схема механизма нагружения прибора ПМТ-3: 1 – поворотная рукоятка; 2 – алмазный индентор; 3 – стержень; 4 – рукоятка; 5 – гайка; 6 и 7 – плоские пружины

На основании прибора установлен предметный столик 3 (рис. 4.2), который может перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью микрометрических винтов 14. Кроме того, столик может поворачиваться вокруг своей оси на  $180^\circ$  до упоров с помощью рукоятки 2. Для нанесения отпечатка испытуемый образец устанавливают под микроскопом и выбирают на нем место, в котором необходимо измерить микротвердость. Затем перемещают образец так, чтобы выбранное место оказалось под острием алмазной пирамиды поворотом предметного столика на  $180^\circ$  до упора. После вдавливания индентора и снятия нагрузки с образца последний вновь переводится под микроскоп и измеряется длина диагонали отпечатка.

### ***Юстировка прибора***

Первой задачей юстировки является точное совмещение оптической оси микроскопа с осью нагружающего устройства при повороте предметного столика на  $180^\circ$ . Иными словами, необходимо добиться, чтобы отпечаток наносился именно в том месте, которое было выбрано под микроскопом. Центрирующее устройство, позволяющее перемещать объектив в горизонтальной плоскости, приводится в действие винтами 12 (рис. 4.2).

Последовательность действий при центрировании следующая (рис. 4.4) Устанавливают перекрестие нитей окуляр-микрометра точно в центре поля зрения микроскопа. Для этого перемещающийся при вращении барабанчика окуляр-микрометра двоянный штрих должен находиться против цифры 4 неподвижной шкалы в окуляре, а нуль шкалы барабанчика точно против риски. Затем перемещением предметного столика со шлифом подводят под перекрестие

выбранное для испытания место (рис. 4.4а). Далее наносят отпечаток, который, если прибор не отцентрирован, получится в стороне от перекрестия (рис. 4.4б). С помощью центрировочных винтов 15 (см. рис. 4.2) перемещают объектив, а вместе с ним и перекрестие до тех пор, пока оно не совпадет с центром получившегося отпечатка «А» (рис. 4.4в). Затем опять перемещают столик (микрометрическими винтами) так, чтобы перекрестие пришлось на то место, где нужно сделать отпечаток (рис. 4.4г). Вновь сделанный отпечаток «Б» должен оказаться точно в необходимом месте (рис. 4.4д).

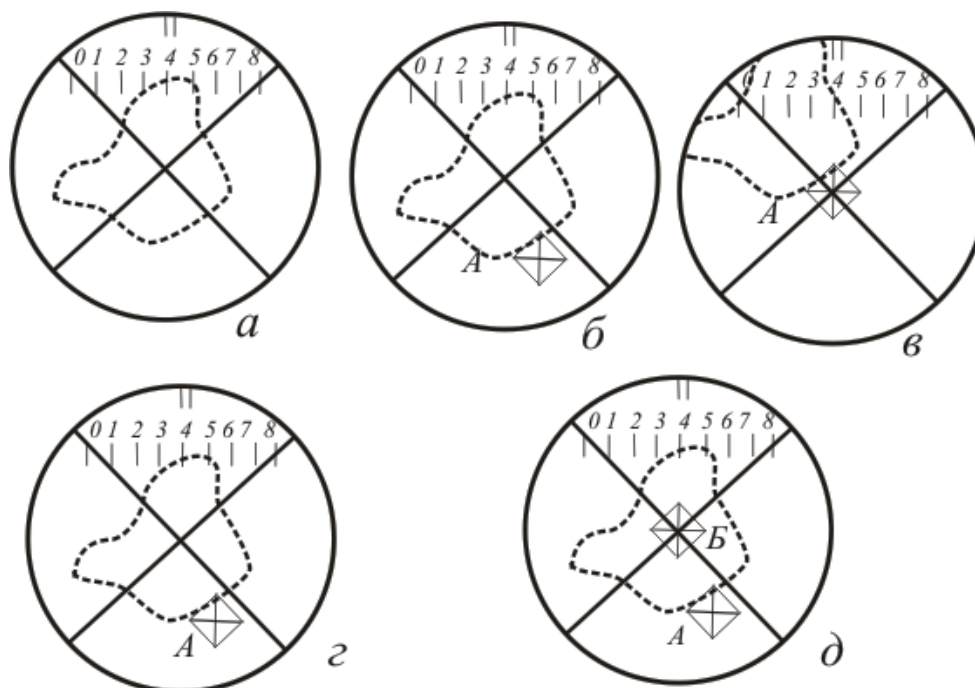


Рис. 4.4. Схемы, поясняющие последовательное выполнение приемов центровки объектива прибора ПМТ-3

Если после первого укола образца отпечаток не обнаружен в поле зрения, необходимо немного сдвинуть шлиф, поставить еще один отпечаток при значительно большей нагрузке (0,5-1 Н), чтобы случайно не пропустить в поле зрения маленький отпечаток, получающийся при малой нагрузке. Если в этом случае отпечаток не окажется в поле зрения (для 40-кратного объектива диаметр поля зрения 0,3 мм), необходимо сменить объектив на 8-кратный, имеющий поле зрения 1,5 мм. После проведения операций центрирования с объективом малого увеличения осторожно ввинчивают 40-кратный объектив и вновь повторяют центрирование. Операции повторяют до тех пор, пока центр отпечатка не совпадет с перекрестием.

«Расцентрирование» прибора обычно связано с использованием разновысоких объектов, то есть центрирование, достигнутое на образце одной высоты, может оказаться

недействительным для объекта другой высоты. Кроме того, при центрировании винтами объектива 12 перемещается закрепленное на этом же узле осветительное устройство. Поэтому нарушение центрирования в процессе работы с одним образцом обычно связано с неосторожным сотрясением осветителя при случайном касании или резкой смене светофильтра (изменении апертурной диафрагмы).

Операции центрирования часто приходится выполнять и в процессе работы, после предварительной настройки прибора.

Второй задачей юстировки является правильная установка по высоте механизма нагружения. При такой правильной установке острие алмаза 2 (рис. 4.3) должно касаться поверхности образца, а микроскоп должен быть сфокусирован на эту поверхность. Юстировка по высоте осуществляется при помощи гайки 5, перемещающей весь механизм нагружения вверх или вниз. Необходимо добиться такого положения, чтобы в отсутствии нагрузки на поверхности шлифа из какого-нибудь мягкого металла, например алюминия или олова, не появлялось отпечатка при опускании стержня 3, а при нагрузке 0,05 Н появился бы очень маленький отпечаток.

Юстировка по высоте может проводиться и на эталоне с точно известной твердостью (например, на кристалле NaCl). Поднимая или опуская нагружающий механизм гайкой 5 (рис. 4.3), необходимо добиться получения отпечатка с такой диагональю, которая бы соответствовала микротвердости эталона.

### ***Порядок работы на приборе ПМТ-3***

1. Подбирают нагрузку и устанавливают нужные диски на стержень 3 (рис. 4.3). В приборе ПМТ-3 выбор грузов обеспечивает испытательные нагрузки от 0,01 до 5 Н. Нагрузка подбирается в зависимости от твердости и размеров испытуемого образца, слоя или структурной составляющей. Оптимальная длина диагонали отпечатка – 30-50 делений барабанчика окуляр-микрометра. При таком размере отпечатка в центральной части поля зрения (биштрих возле 4-го деления шкалы окуляра), обеспечивает наибольшую точность измерения, так как в этом случае оптические искажения минимальны.

2. С помощью специального пресса устанавливают образец в пластилине на специальной подставке. Использование пресса и пластилина позволяет добиться параллельности плоскостей поверхности шлифа, подставки и предметного столика.

3. Подставку устанавливают на столик так, чтобы закрепленный на ней образец оказался под объективом микроскопа. Предварительно микроскоп с помощью гайки 6 и винта 8 (рис. 4.2) надо поднять на такую высоту, чтобы объектив не касался образца. Подставку

закрепляют на предметном столике прижимными лапками. При помощи винтов 7 и 8 производится наводка на резкость. Поворотом глазной линзы устанавливают на резкость перекрестие окуляр-микрометра 9.

4. Перемещая микрометрическими винтами 14 предметный столик со шлифом, устанавливают перекрестие над тем местом образца, где необходимо измерить твердость.

5. С помощью поворотной рукоятки 2 (рис. 4.2) переводят столик в крайнее левое положение до упора с тем, чтобы образец оказался под индентором. Рукоятку 4 (рис. 4.3) равномерно поворачивают на себя в течение не менее 15 с (ГОСТ 9450-76). Длительность выдержки под нагрузкой должна быть не менее 5 с. После выдержки поворотом рукоятки в обратном направлении снимают нагрузку и поворотом столика переводят образец под объектив микроскопа. Необходимо обращать внимание на идентичность условий нагружения: в каждой серии опытов для получения сравнимых результатов надо, чтобы время нагружения и время выдержки под нагрузкой было строго одинаковым.

6. Если отпечаток окажется в центре перекрестия, производят замер длины его диагонали с помощью барабанчика окуляр-микрометра. Цена его деления при использовании объектива ОЭ-6 составляет примерно 0,31 мкм (этот объектив дает в сочетании с 15-кратным окуляром увеличение 485). Для измерения длины диагонали отпечатка его левый край подводят с помощью микрометрических винтов предметного столика к перекрестию окуляр-микрометра (рис. 4.5). При этом биштрих стоит на цифре 4, а нуль барабанчика – против риски. Далее вращением барабанчика окуляр-микрометра перемещают перекрестие в правую вершину квадратного отпечатка. Цифра, установившаяся против риски на барабанчике окуляр-микрометра, даст число делений  $m$ , которое соответствует длине диагонали  $d = m \cdot 0,31$  мкм.

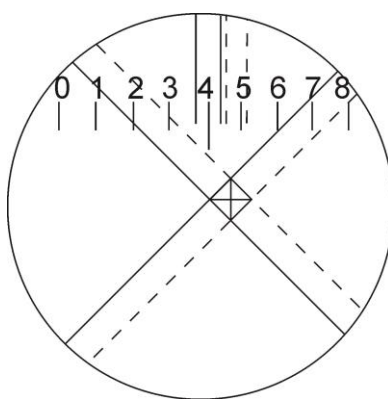


Рис. 4.5. Схема измерения длины диагонали отпечатка

При измерении микротвердости расстояние между центрами соседних отпечатков должно быть не менее двух длин диагонали большего отпечатка. Таким же должно быть расстояние от центра отпечатка до края образца. Длина диагонали отпечатка должна быть не более полуторной толщины образца (слоя) или испытываемой структурной составляющей.

Для определения числа микротвердости по длине диагонали при разных нагрузках  $P$  имеются специальные таблицы (см., например, табл. П5.1 в приложении 5). Хотя таблица составлена только для нагрузки 50 гс, ее можно использовать при определении  $HV$  с любыми нагрузками. Например, если при  $P = 20$  гс длина диагонали отпечатка оказалась 15 мкм, то исходя из прямой пропорциональности между  $HV$  и  $P$ , определяем  $HV = 412/2,5 = 165$ .

## 2.2 Автоматизированный твердомер 402MVD

В настоящее время на смену прибору ПМТ-3 приходят автоматизированные твердомеры, в которых контроль нагрузки (нагружение, выдержка, разгрузка) осуществляется в автоматическом режиме. Одним из таких приборов является цифровой микротвердомер 402MVD фирмы Wolpert (Нидерланды), внешний вид которого приведен на рис. 4.6.

Измерительный микроскоп 8 предназначен для измерения длин диагоналей отпечатка, которые отсылаются во встроенное вычислительное устройство для последующего расчета значений микротвердости. На поворотной турели 7 установлены два объектива 6 с разным увеличением и алмазный индентор 10. На шпинделе 3, перемещающемся при вращении маховика 11, установлен предметный столик 5, на котором смонтированы микрометрические винты 4 для перемещения столика в горизонтальной плоскости.

С помощью ручки 9 осуществляется выбор нагрузки в диапазоне от 10 г до 2 кг. Клавиатура 1 служит для выбора и редактирования программы испытания, установки длительности выдержки под нагрузкой, управления турелью, освещенностью и т.д. Текущая информация по процедуре испытания отображается на дисплее 2.

После включения прибора проводят обнуление показания окуляр-микрометра, встроенного в измерительный микроскоп 8. Для этого совмещают риски окуляр-микрометра вместе и нажимают кнопку «ZERO» на клавиатуре. Выбирают уровень желаемой нагрузки вращением ручки 9, после чего для подтверждения нажимают кнопку «OK». С помощью клавиатуры перемещают объектив 6 в рабочее положение и под него устанавливают на столик 5 образец. Затем, медленно вращая маховик 11, подводят столик вверх и производят настройку резкости.

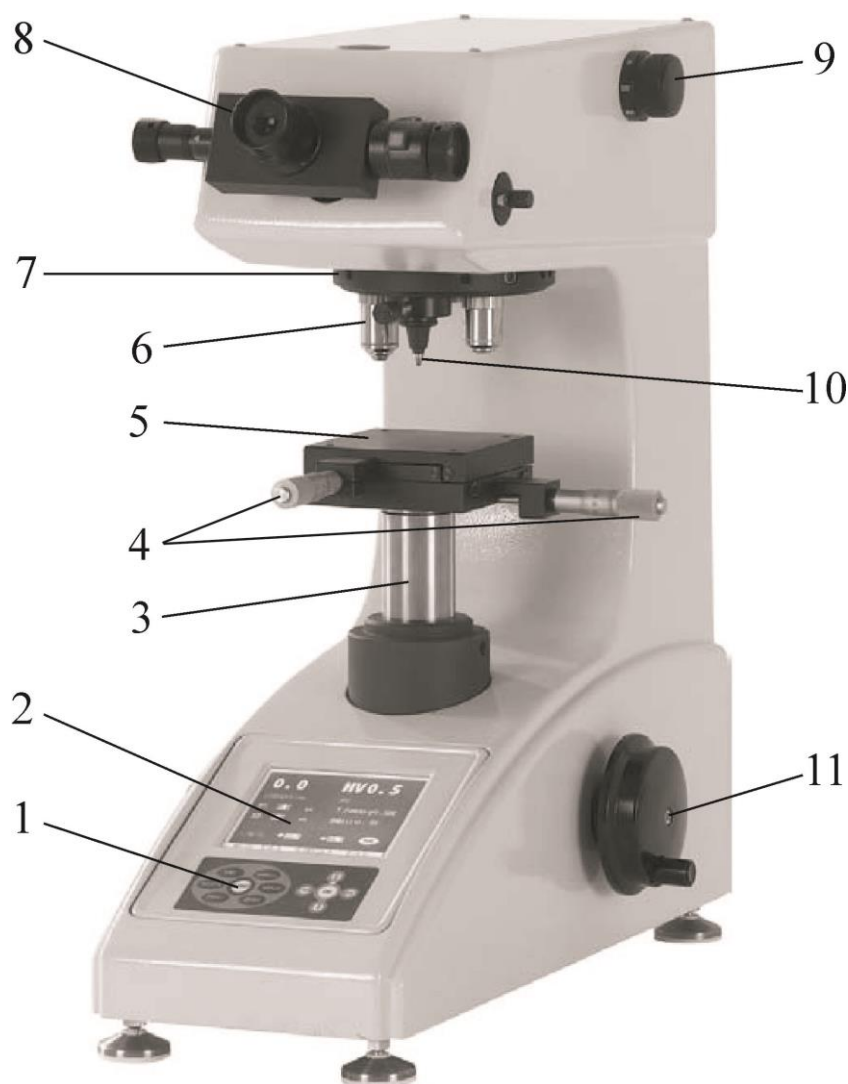


Рис. 4.6. Внешний вид микротвердомера 402MVD фирмы Wolpert:

1 – мембранная клавиатура; 2 – жидкокристаллический дисплей; 3 – шпиндель; 4 – микрометрические винты; 5 – предметный столик; 6 – объектив; 7 – турель; 8 – измерительный микроскоп; 9 – ручка выбора нагрузки; 10 – алмазный индентор; 11 – маховик

С помощью микрометрических винтов 4 выбирают место на образце, где необходимо произвести измерение твердости. Начинают испытание нажатием кнопки «START». При этом индентор 10 путем поворота турели 7 устанавливается в рабочее положение над выбранным местом, после чего происходит нагружение. После заданного времени выдержки нагрузка снимается и с помощью турели индентор возвращается в исходное положение.

Далее с помощью измерительного микроскопа проводят измерение диагоналей отпечатка. Для этого вращением левого винта совмещают левую риску окуляр-микрометра с левым углом отпечатка. Соответственно вращением правого колесика с противоположным углом совмещают вторую риску. Затем нажимают кнопку считывания данных на



измерительном микроскопе для записи значения  $D1$ . Процедуру повторяют для записи значения диагонали  $D2$ . После этого на дисплее 2 отображается значение твердости материала. Для серии измерений осуществляется расчет среднего арифметического значения и погрешности.

#### 4. Задание по работе

1. Ознакомиться с устройством и методикой работы на приборе ПМТ-3. Отцентрировать прибор.
2. Определить среднюю микротвердость на периферии и в центре дендритных ячеек литого сплава алюминия с 5%Cu.
3. Построить зависимость микротвердости от концентрации меди в алюминиевом твердом растворе закаленных после гомогенизации образцов из сплавов разного состава (от 2 до 6 %Cu). Пользуясь этим графиком, перевести значения микротвердости центра и периферии дендритных ячеек в концентрации меди ( $C_{\text{центра}}$  и  $C_{\text{периф}}$ ) и оценить  $\Delta C = C_{\text{периф}} - C_{\text{центра}}$  для исследуемого сплава.

#### 5. Требования к отчету

В отчете должны быть представлены все результаты эксперимента, построен график  $HV$  – % Cu в алюминиевом растворе, оценена среднеквадратичная ошибка определения  $HV$ .

Порядок оформления записей в лабораторной тетради см. в описании к лабораторной работе 1.

#### 6. Литература

1. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Metallurgy, 1998, с.278-284.

#### 7. Контрольные вопросы

1. Что такое число микротвердости?
2. Какова размерность числа микротвердости?
3. Какова размерность  $d$  в формуле  $HV = 1,854P/d^2$ ?
4. Какова размерность  $P$  в формуле  $HV = 1,854P/d^2$ ?
5. Какова форма индентора при определении микротвердости?

6. В каком интервале может изменяться нагрузка при определении микротвердости?
7. В каких пределах обычно колеблется величина диагонали отпечатка при определении микротвердости?
8. Какова глубина вдавливания индентора при определении микротвердости?
9. Какие существуют методы удаления поверхностного слоя металлографических шлифов?
10. Какова зависимость микротвердости от времени удаления наклепанного слоя?
11. Чем задается величина нагрузки на индентор при определении микротвердости?
12. Как осуществляется наводка изображения на резкость в приборе ПМТ-3?
13. Как устанавливается образец под индентор при определении микротвердости?
14. Как установить плоскость шлифа перпендикулярно оптической оси прибора ПМТ-3?
15. Как вывести отпечаток индентора на ось микроскопа?
16. С какой целью производится выверка механизма нагружения по высоте?
17. Каково минимальное время приложения нагрузки при определении микротвердости?
18. Как задается скорость нагружения при определении микротвердости?
19. Какова цена деления окуляр-микрометра прибора ПМТ-3 при увеличении 485х?

## Лабораторная работа 5

### ИСПЫТАНИЯ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ И ЗАМЕДЛЕННОЕ РАЗРУШЕНИЕ

(3 часа)

#### 1. Цель работы

Привить навыки определения предела длительной прочности, долговечности и ознакомить с испытаниями на замедленное разрушение.

#### 2. Теоретическое введение

При статических (лабораторные работы 1 и 2) и динамических испытаниях материалов на образец воздействуют деформирующим инструментом с определенной скоростью, а фиксируют сопротивление материала такой деформации, т.е. независимой переменной является деформация. В методах измерения твердости (лабораторные работы 3 и 4) используют воздействие грузов, как независимую переменную, а измеряется деформация, которую совершил индентор в виде отпечатка. Деформация, которая возникает в материалах под действием постоянных приложенных нагрузок, присутствует всегда, но особенно легко она обнаруживается при повышенных температурах: постоянные напряжения вызывают течение материалов с той или иной скоростью. Это явление называют ползучестью. Процесс ползучести характеризуют кривой в координатах деформация – время.

Кривая высокотемпературной ползучести (рис. 5.1) состоит из трех участков, соответствующих стадиям неустойчивой ( $o'a$ ), установившейся ( $ab$ ) ползучести и стадии разрушения ( $bc$ ). Длительную прочность определяют на третьей стадии ползучести, когда материал накапливает в своей структуре изменения, приводящие далее к разрушению.

Длительная прочность – одна из важнейших характеристик жаропрочности металлических материалов, которая характеризует способность металлов работать под напряжением в условиях повышенных температур без разрушения. Для оценки сопротивления материала разрушению проводятся испытания на длительную прочность, суть которых сводится к тому, что образец доводится до разрушения под действием постоянной растягивающей нагрузки при постоянной температуре. В результате испытаний определяют условный предел длительной прочности, т.е. условное наибольшее напряжение, вызывающее разрушение металла за определенное время испытания при постоянной температуре.

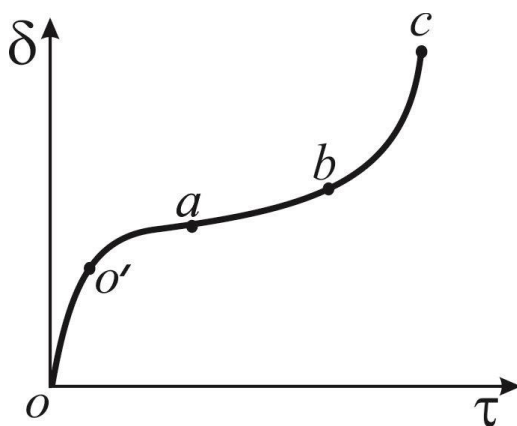


Рис. 5.1. Типичная кривая высокотемпературной ползучести Удлинение ( $\delta$ ) – Время ( $\tau$ ) при постоянном напряжении (иногда нагрузке) и температуре

Иногда (при приемосдаточных и других контрольных испытаниях) предел длительной прочности не рассчитывают, а ограничиваются установлением соответствия между временем до разрушения (долговечностью) и нормой времени, указанной в стандартах или технических условиях на металлопродукцию.

Основным результатом испытания является установление времени до разрушения –  $\tau_p$  под воздействием заданного напряжения –  $\sigma$  и температуры. Связь между  $\tau_p$  и  $\sigma$  хорошо аппроксимируется уравнением:

$$\tau_p = B \cdot \sigma^{-m}, \quad (5.1)$$

где  $B$  и  $m$  – константы материала.

Из этого следует, что по результатам испытаний нескольких образцов может быть установлена зависимость между напряжением и временем до разрушения, которая будет выражена прямыми, построенными в логарифмических координатах  $\lg \sigma - \lg \tau_p$ . По этим графикам определяют условный предел длительной прочности металла (рис. 5.2). При испытаниях на жаропрочность рекомендуется определять условные пределы длительной прочности на основе испытаний длительностью 50, 100, 500, 1000, 3000, 5000 и 10000 ч, если не требуется иная база испытания (ГОСТ 10145-81).

Считается, что причиной разрушения образца при испытании на длительную прочность является образование и развитие пор и трещин по границам зерен на третьей стадии кривой ползучести.

В условиях сильно развитой межзеренной деформации высока вероятность зарождения трещины на границе перемещающихся один относительно другого кристаллов в растягиваемом образце. Например, в ненагруженном состоянии границы между зернами  $A$ ,  $B$  и  $C$  уравновешены силами поверхностного натяжения (рис. 5.3). При приложении внешней растягивающей нагрузки сумма внешних и внутренних сил, действующих на зерно  $C$ , приведет

к межзеренному смещению последнего и образованию трещины в месте стыка трех зерен и последующему ее росту вдоль границ  $A-C$  и  $B-C$ .

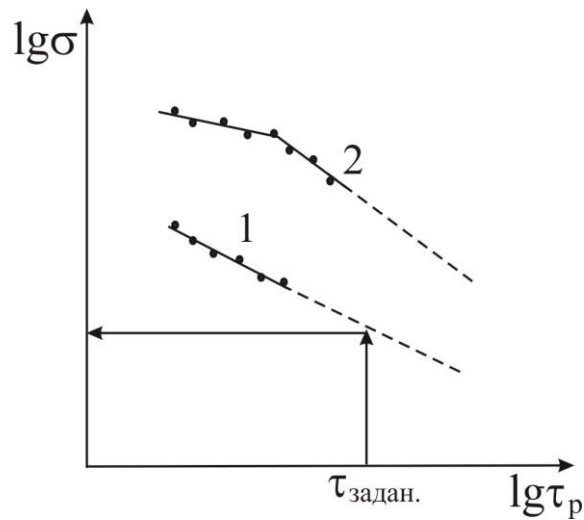


Рис. 5.2. Типичные зависимости времени до разрушения от приложенного напряжения:  
1 – при действии одного механизма разрушения; 2 – при действии двух различных механизмов разрушения

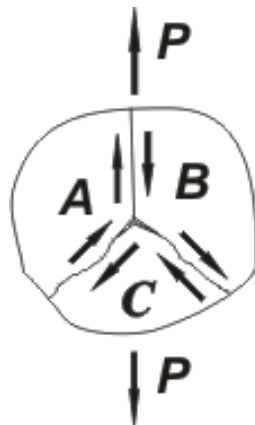


Рис. 5.3. Одна из схем зарождения трещины в стыке трех зерен

При относительно низких температурах и высоких напряжениях испытания в стыках могут образовываться так называемые клиновые трещины, как результат действия максимальных растягивающих напряжений в тройном стыке:

$$S_{\max} = t \cdot \left( \frac{L}{2r} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5.2)$$

где  $t$  – касательное напряжение вдоль границы;

$L$  – длина границы;

$r$  – радиус кривизны границы в вершине стыка.

Вероятен и другой механизм образования и развития пор – слияние и сток вакансий. Растущая пора становится устойчивой, если ее радиус:

$$r > \frac{2\gamma}{S}, \quad (5.3)$$

где  $S$  – растягивающее напряжение;  $\gamma$  – поверхностная энергия.

Из этого следует, что поры, не достигшие критического радиуса, могут "залечиваться", а величина  $r$  будет тем меньше, чем выше напряжение.

В гетерогенных сплавах поры образуются чаще всего на межфазной границе, т.к. частицы избыточных фаз по границам зерен могут затруднять межзеренное скольжение. Вероятность образования таких пор возрастает, при условии высокого значения поверхностной энергии на границе матрицы – избыточная фаза, а выделение имеет компактную форму.

Разрушение может происходить как по телу зерна, так и по границам. При высоких температурах и низких действующих напряжениях облегчается межзеренное разрушение, так как в этих условиях ускорен рост межкристаллитных пустот за счет стока в них вакансий. В интервале средних температур значительна степень внутризеренной деформации, поскольку пластичность материала достигает максимальных значений.

В области относительно низких температур вероятность межзеренного разрушения вновь возрастает, так как в этих условиях снижается способность материала к зернограницному скольжению и мала скорость возврата. В случае, когда при испытаниях наблюдается переход от внутризеренного или смешанного разрушения к межзеренному на зависимости  $\lg \sigma - \lg \tau_p$  может наблюдаться точка перелома, которая и соответствует переходу одного механизма разрушения в другой (рис. 5.2, кривая 2).

Таким образом, условный предел длительной прочности, который обозначается  $\sigma_t^t$ , где  $t$  – температура испытания в °С,  $\tau$  – заданная продолжительность испытания до разрушения в часах, характеризует способность материала противостоять разрушению при длительном воздействии температуры и напряжения т.е. его жаропрочность.

Жаропрочность или сопротивление ползучести любого сплава в первую очередь зависит от гомологической температуры испытания. Чем она выше, тем быстрее развиваются диффузионные процессы, и при любом механизме ползучести ее скорость растет. Поэтому при легировании добавки выбирают так, чтобы солидус сплава в результате их введения повышался или, по крайней мере, несильно снижался, а их диффузионные характеристики способствовали снижению подвижности атомов основы.

Все факторы, затрудняющие неконсервативные движения дислокаций, такие как снижение энергии дефектов упаковки, образование атмосфер примесных атомов на

дислокациях, повышение энергии антифазных границ способствуют повышению жаропрочности.

На сопротивлении ползучести и повышении длительной прочности сплавов могут заметно сказываться характеристики структуры. Так, скорость ползучести существенно снижается при увеличении размера зерна за счет уменьшения вклада диффузионной ползучести, но только до 100 мкм. Дальнейшее укрупнение зерна уже почти не влияет на жаропрочность.

Для обеспечения высокой жаропрочности в промышленных сплавах почти всегда содержатся легирующие элементы и примеси, вызывающие образование частиц избыточных фаз-упрочнителей. Многие жаропрочные сплавы термически упрочняются. В них частицы фаз-упрочнителей образуются во время старения после закалки. В условиях длительной работы при высоких температурах в стареющих сплавах обычно трудно сохранить максимальную дисперсность выделений, обеспечивающих наименьшую скорость ползучести и большое время до разрушения. Во время эксплуатации при температурах выше  $0,5-0,6 T_{пл}$  частицы обычно укрупняются, увеличивается расстояние между ними и снижается эффект упрочнения.

С целью хотя бы частичного предотвращения этого процесса легирующие элементы выбирают таким образом, чтобы избыточная фаза состояла из медленно диффундирующих компонентов и не содержала атомов основы. Такие фазы – это обычно металлические соединения со сложной решеткой и высокой собственной жаропрочностью.

Наибольшими характеристиками жаропрочности отличаются дисперсноупрочненные материалы, содержащие в матрице не взаимодействующие с ней частицы, например, карбиды, бориды, нитриды или окислы. Скорость ползучести прямо пропорциональна квадрату расстояния между частицами и обратно пропорциональна их линейному размеру.

Сплошные оторочки выделений избыточных фаз по границам зерен обычно положительно сказываются на характеристиках жаропрочности, в противоположность низкотемпературной прочности и пластичности. Именно поэтому максимальная жаропрочность литейных сплавов выше, чем у деформируемых (на той же основе).

Метод испытания на длительную прочность регламентируется ГОСТ 10145-81. Для испытаний используют цилиндрические или плоские образцы, конструкция головок которых определяется принятым способом крепления образца в захватах испытательной машины. Основные цилиндрические образцы стандартизованы. Они должны иметь рабочую часть диаметром  $d_0 = 5, 7$  или  $10$  мм и расчетную длину  $l_0 = 5d_0$  или  $10d_0$ . Допускаются другие пропорциональные образцы, но с  $d_0 \geq 3$  мм.

Разрушение под действием низких напряжений, но выше некоторого порогового значения, может происходить и при комнатной температуре, что является характерным для

некоторых высокопрочных сплавов. Разрушение, которое происходит через некоторое время после начала действия постоянного напряжения при температурах, близких к комнатной, и которое характеризуется, как правило, межзеренным макрорхрупким изломом, получило название замедленного разрушения.

При испытаниях на замедленное разрушение при комнатной температуре, чтобы более оперативно проводить испытания большого числа образцов, можно воспользоваться приспособлением, изображенным на рис. 5.4.

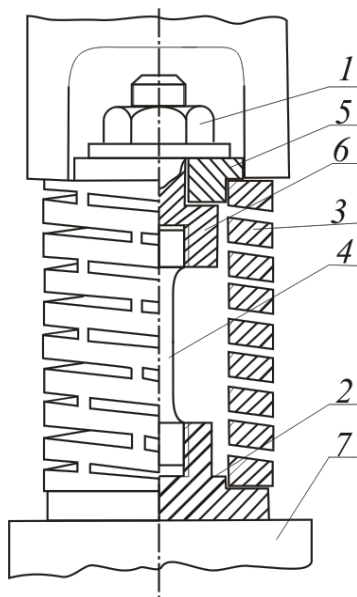


Рис. 5.4. Схема приспособления для нагружения образца при испытании на замедленное разрушение:

1 – гайка фиксации образца под нагрузкой; 2 – нижний резьбовой захват; 3 – пружина; 4 – образец с резьбовыми головками; 5 – прижимная шайба; 6 – верхний резьбовой захват; 7 – опора нажимного устройства

В основе приспособления лежит пружина 3, которая сжимается на универсальной испытательной машине. Значение заданного напряжения контролируется по показаниям силоизмерительного прибора машины. В нагруженном состоянии верхняя нажимная шайба 5 пружины закрепляется гайкой 1. По мере ее завинчивания силоизмеритель показывает снижение усилия машины до нуля. После разгрузки машины образец удерживает пружину в сжатом состоянии, а пружина поддерживает в образце заданное усилие (напряжение). Тензометрические исследования показали, что растягивающие напряжения на образце соответствуют заданным и сохраняются неизменными в течение нескольких месяцев. Время до разрушения при заданной величине напряжения является основным показателем данного вида испытаний. После разрушения образца определяют относительное удлинение и сужение.



### 3. Оборудование для испытаний на ползучесть и длительную прочность

Для испытания на ползучесть и длительную прочность используются машины, состоящие из нагружающего устройства, нагревательной печи с терморегулятором, приборов для измерения температуры и деформации. По способу нагружения различают испытательные машины с непосредственным нагружением грузами и с нагружающим устройством рычажного типа (рис. 5.5).

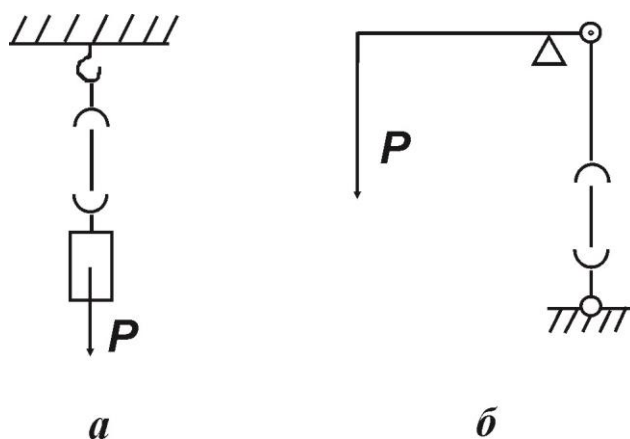


Рис. 5.5. Типовые схемы нагружения для испытаний на ползучесть и длительную прочность:

а – непосредственное нагружение грузом; б – рычажное нагружение

Основные требования, предъявляемые к нагревательным печам установок: 1) одинаковая температура образца по расчетной длине; 2) постоянная температура во время опыта; 3) надежный непрерывный нагрев в течение весьма длительного времени. Допустимый перепад температуры по длине образца при испытаниях составляет от  $\pm 3$  до  $\pm 6$  °С в зависимости от расчетной длины образца и температуры нагрева. Чем короче образец и ниже температура нагрева, тем жестче допуск.

Настоящая лабораторная работа выполняется на рычажной машине для испытаний на ползучесть и длительную прочность модели МЗ компании Instron-Satec, внешний вид которой представлен на рис. 5.6.

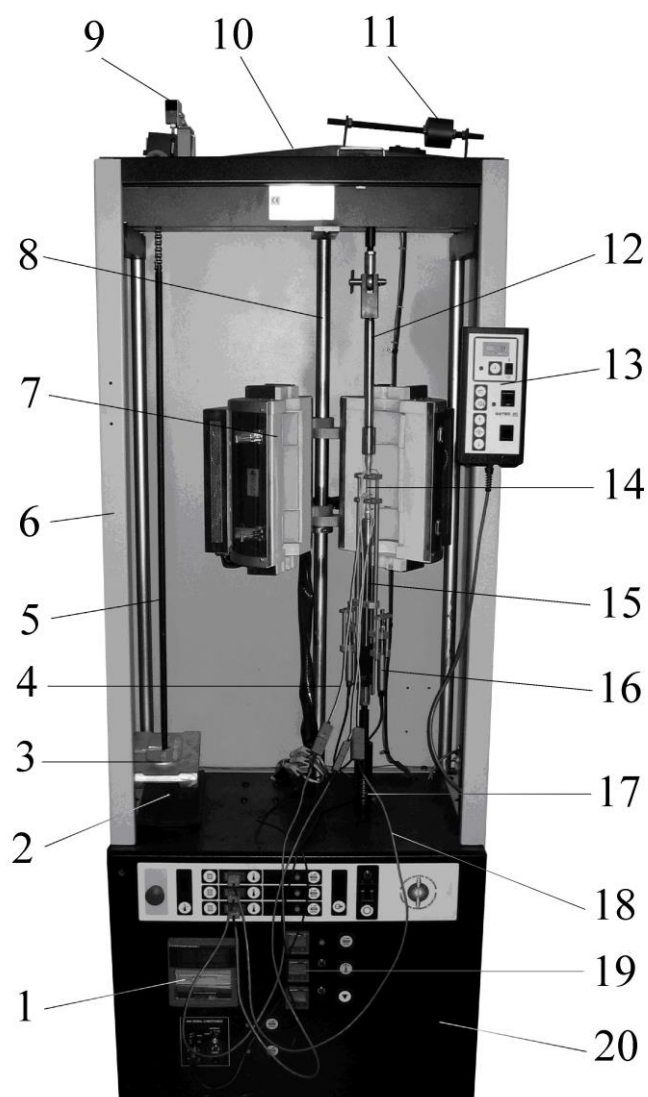


Рис. 5.6. Внешний вид машины для испытаний на ползучесть и длительную прочность модели М3 компании Instron-Satec:

1 – самопишущий прибор; 2 – нижний концевой выключатель; 3 – груз; 4 – термопара; 5 – штанга подвеса для грузов; 6 – верхний шкаф; 7 – печь с разъемом по вертикали из двух половинок; 8 – несущая колонна печи; 9 – верхний концевой выключатель; 10 – рычаг; 11 – противовес; 12 – штанга верхнего захвата; 13 – пульт ручного управления; 14 – образец; 15 – штанга нижнего захвата; 16 – экстензометр; 17 – тянущая головка; 18 – удлинитель термопары; 19 – контроллер температуры; 20 – нижний шкаф

Нагружающая рама М3 состоит из нижнего 20 и верхнего 6 шкафов. Нижний шкаф или основание служит опорой для верхнего и в нем размещается узел привода тянущей головки 17, а также самописец 1 и терморегулятор 19. В верхнем шкафу размещена печь 7, закрепленная на стержне 8, и смонтировано нагружающее устройство. Нагружение образца 14 осуществляется за счет использования рычага 10, соотношение плеч которого составляет 16:1. Нагрузка

прикладывается к образцу с помощью узла поддона 5 грузами 3 через верхний стержень 12. Через нижний стержень 15 образец жестко соединен с тянущей головкой 17, способной перемещаться на расстояние до 100 мм для установки рычага в горизонтальное положение при испытании.

Выравнивание рычага в исходном положении осуществляется с помощью противовеса 11. Машина сконструирована таким образом, что по мере удлинения образца во время испытания рычаг все время удерживается в горизонтальном положении. При удлинении образца, когда рычаг отклоняется от горизонтального положения на величину, достаточную для срабатывания специального бесконтактного переключателя, запускается двигатель тянущей головки, возвращая рычаг в исходное положение. Таким образом, поддерживается во время испытания постоянная нагрузка.

Верхний концевой выключатель 9 предусмотрен для защиты рычага от повреждения при работе двигателя тянущей головки. В случае его срабатывания двигатель не сможет перемещать тянущую головку в нижнем направлении. Срабатывание нижнего концевой выключателя 2 происходит при разрушении образца и падении поддона с грузом. В этом случае электропитание печи и двигателя отключается, также останавливается цифровой таймер на пульте управления 13, отсчитывающий время испытания.

В пульте ручного управления 13, кроме таймера, размещаются органы управления тянущей головкой. Двухпозиционный переключатель режимов позволяет сделать выбор между автоматической и ручной работой. Автоматический режим является типичным режимом испытания. В этом случае происходит удержание рычага в горизонтальном положении. В ручном режиме функционирует переключатель ручного позиционирования тянущей головки. Он используется между испытаниями для установки цепи нагружения образца, состоящей собственно из образца и верхней и нижней штанг соответствующих захватов.

Контроль и регулирование температуры в печи осуществляются контроллерами Eurotherm 19 с помощью термопар 4, которые подсоединены через удлинители 18 к панели электропитания, расположенной на нижнем шкафу и отмеченной белой областью. Контроль проводится по трем зонам. Помимо разъемов термопар на панели расположены выключатель электропитания и кнопка аварийной остановки.

Запись кривых изменения температуры по трем зонам, а также удлинения образца (кривой ползучести) ведется на миллиметровую ленту с помощью самопишущего прибора 1. Измерение удлинения осуществляется экстензометром 16.

Порядок работы на машине МЗ следующий. Перед проведением испытаний на все сопрягаемые части цепи образца, имеющих резьбу, наносят высокотемпературную смазку. Это делается для предотвращения повреждения при разборке элементов цепи. Затем собирают всю

цепь вместе с образцом 14, верхним 12 и нижним 15 захватами. В случае использования экстензометра 16 его надежно прикрепляют к образцу с использованием удлинительных стержней, идущих вдоль нижней части цепи нагружения.

Эта операция для удобства выполняется на плоской горизонтальной поверхности, например, на столе. Здесь же на образце с помощью проволоки закрепляют термопары 4 таким образом, чтобы их спаи находились в контакте с поверхностью образца. После этого узел цепи нагружения помещают в печь 7 и закрепляют верхний конец. Далее пропускают провода термопары из нижней части печи и ее закрывают. После этого подсоединяют нижний конец цепи к тянущей головке 17, для чего может оказаться необходимым отрегулировать ее положение (поднять или опустить).

На поддон для грузов 5 устанавливают грузы 3, величину которых можно рассчитать по следующей формуле:

$$P = \frac{\sigma \cdot F}{R}, \quad (5.4)$$

где  $P$  – величина груза, помещаемого на поддон, кг;

$\sigma$  – заданное напряжение в образце, кгс/мм<sup>2</sup>;

$R$  – соотношение плеч рычага ( $R = 16$ ).

По необходимости центрируют положение цепи нагружения образца в вертикальном направлении относительно печи. Затем вставляют термопары в соответствующие разъемы на панели электропитания. С помощью специальных изоляционных дисков и материалов из керамического волокна выполняют герметизацию печных каналов. Далее на контроллере 19 выставляют заданную температуру, и переключатель питания печи переводят во включенное положение. Самопишущий прибор 1 при этом включается автоматически. После нагрева образца и выдержки при заданной температуре не менее 1 ч к образцу прикладывают нагрузку посредством включения автоматического режима на пульте управления 13. Здесь же для отсчета времени испытания включают таймер, предварительно его обнулив. После того, как поддон для грузов поднимется с нижнего концевого выключателя 2, таймер начнет работу. При срабатывании выключателя вследствие разрушения образца отсчет времени прекращается.

Время до разрушения при заданной величине напряжения является основным показателем испытаний на длительную прочность. После разрушения образца определяют относительное удлинение и сужение образца.

Результаты испытаний считаются недействительными, если разрушение произошло по размоточным рискам, за пределами расчетной длины образца или по дефектам металлургического производства.

#### 4. Порядок проведения работы и указания по технике безопасности

1. Получить от преподавателя первичные данные испытаний на длительную прочность при разных напряжениях для нескольких сплавов. Построить зависимости логарифма напряжения от логарифма времени и по ним определить условные пределы длительной прочности и долговечность каждого сплава.

2. Дать анализ причин различия построенных кривых  $\lg\sigma - \lg t$  различных сплавов.

3. Провести измерение и разметку образцов для испытаний на замедленное разрушение, выданных преподавателем. Начальную расчетную длину  $l_0$  ограничивают рисками или кернами с точностью  $\pm 1\%$ . Измерение диаметра образца проводят с точностью до 0,05 мм.

4. Закрепить образец в верхнем и нижнем захвате приспособления, как указано на рис. 5.4, и произвести сжатие пружины на машине ИР 5057-50 до величины, соответствующей напряжению в образце  $0,6-0,8 \sigma_{0,2}$ . Завернуть контргайку до упора. Разгрузить машину и произвести отсчет времени.

5. Зафиксировав время до разрушения, проводят измерение  $\delta$  и  $\psi$ . По результатам испытания нескольких образцов построить графическую зависимость  $\lg\sigma - \lg t_p$ , по которой определить коэффициенты  $B$  и  $m$ .

6. Испытательная машина с приспособлением для испытания является потенциальным источником механического повреждения и поражения электрическим током, для предупреждения которых следует выполнять следующие требования при работе:

- категорически запрещается работать на испытательной машине, не защищенной соответствующими конструкциями кожухами и крышками, при наличии оголенных электропроводов, клемм или контактов;

- нагружение пружины приспособления, равно как и разгрузку, проводить только в присутствии преподавателя или лаборанта;

- при переносе приспособления в термостат соблюдать крайнюю осторожность, т.к. при разрушении образца пружина может "выстрелить" его части. Эту операцию проводить также только в присутствии преподавателя или лаборанта.

#### 5. Требования к отчету по работе

В отчете по работе должны быть представлены построенные кривые длительной прочности, результаты их анализа и таблицы числовых результатов определения длительной прочности и долговечности.

Должна быть построена графическая зависимость  $\lg \sigma - \lg \tau_p$  для замедленного разрушения и представлены результаты определения коэффициентов  $B$ ,  $m$  и порогового напряжения разрушения.

Результаты испытаний должны быть представлены в виде протокола испытаний, оформленного как таблица, например:

Таблица

Состав сплава:

Вид и режимы термической обработки:

№ образца	Температура испытания, °C	$\sigma$ , МПа	$l_0$ , мм	$l_k$ , мм	$\tau_p$ , час	$F_0$ , мм <sup>2</sup>	$F_k$ , мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\psi$ , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

## 6. Литература

1. Золоторевский В.С.. Механические свойства металлов. М.: Металлургия. 1998, С. 286-313.

## 7. Контрольные вопросы

1. В чем отличие длительной прочности от долговечности?
2. Как зависит время до разрушения образца от приложенного напряжения?
3. Какие стадии выявляются при высокотемпературной ползучести?
4. По какому механизму происходит разрушение при ползучести и какими факторами он определяется?
5. Какие требования предъявляются при испытании на длительную прочность и замедленное разрушение?
6. В каком случае испытания считаются недействительными?
7. Чем контролируется скорость высокотемпературной ползучести?
8. Как влияет температура испытания на характеристики жаропрочности?
9. Какое значение для жаропрочности сплавов имеет легкость неконсервативных движений дислокаций?
10. Какие требования предъявляют к растворимым в основе легирующим элементам жаропрочных сплавов?

11. Как и почему влияет на жаропрочность энергия дефектов упаковки?
12. Каковы механизмы влияния растворенных атомов на жаропрочность?
13. Какие морфологические характеристики частиц избыточных фаз и как влияют на жаропрочность?
14. Почему у дисперсноупрочненных сплавов характеристики жаропрочности могут быть выше, чем у закаленных и состаренных?
15. Почему литые сплавы обычно имеют жаропрочность выше, чем деформированные того же состава?
16. Что такое замедленное разрушение?

## Лабораторная работа 6

# ИСПЫТАНИЯ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВКЛАДА ВНУТРИЗЕРЕННОЙ И МЕЖЗЕРЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ОБЩЕЕ УДЛИНЕНИЕ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

(6 часов)

### 1. Цель работы

Научить обработке результатов испытаний на ползучесть, проведению сравнительного анализа кривых ползучести металлов и сплавов с разным составом и структурой, знакомство с методами измерения внутризеренной и межзеренной деформации и приобретение навыков оценки вкладов внутризеренного и зернограничного скольжения в общее удлинение при ползучести.

### 2. Теоретическое введение

Методика проведения испытания на ползучесть близка к методике испытания на длительную прочность. ГОСТ 3248-81 устанавливает для испытаний на ползучесть цилиндрические образцы диаметром 10 мм и расчетной длиной 100, 150 и 200 мм, а также плоские образцы шириной 15 мм и  $l_0 = 100$  мм. Суть испытаний состоит в построении кривых ползучести, определении скорости ползучести на стадии установившегося течения (рис. 5.1) при разных напряжениях и постоянной температуре. Образцы в таких испытаниях до разрыва не доводят, ограничиваясь стадией установившегося течения. Затем строят зависимость логарифма скорости установившегося течения от логарифма приложенного напряжения, по которой определяют условный предел ползучести – условное напряжение, вызывающее при данной температуре скорость ползучести [%/час] заданной величины.

При постоянном напряжении скорость установившейся ползучести:

$$v_{\text{п.уст.}} = K_0 \cdot e^{-\frac{Q}{kT}}, \quad (6.1)$$

где  $K_0$  – постоянная, зависящая от уровня напряжения;

$Q$  – энергия активации ползучести, близкая к энергии активации самодиффузии.

Увеличение напряжения также приводит к росту скорости ползучести:

$$v_{\text{п.уст.}} = A \cdot S^n, \quad (6.2)$$

где  $n$  при разных температурах и напряжениях колеблется от 1 до  $\sim 4$ , и чаще всего близко к 3.



Ползучесть металлов является результатом ряда различных процессов, протекающих в материале вследствие одновременного воздействия приложенных напряжений и температур. Скольжение дислокаций – основной микромеханизм пластической деформации и при высокотемпературной ползучести, но малые скорости процесса (на 5-9 порядков ниже скоростей статических испытаний) придают ему ряд отличительных особенностей, а также в этих условиях может действовать диффузионная ползучесть. Скорость ползучести на всех стадиях растет с повышением температуры из-за ускорения диффузионных процессов и при дислокационной, и при диффузионной ползучести.

Высокие температуры и малые скорости деформации являются причинами изменения числа систем скольжения, активизации неконсервативных движений дислокаций и формирования полигонизованной структуры металла. Образование пространственной сетки малоугловых границ в объеме металла сочетается с появлением грубых, волнистых полос скольжения и со следами тонкого скольжения между ними на поверхности образца.

Главная отличительная особенность пластической деформации при ползучести, осуществляемой движением дислокаций, – интенсивное развитие зернограницного скольжения. Зернограницное скольжение при ползучести независимо от того, осуществляется ли оно различной внутризеренной деформацией соседних кристаллов при скольжении решеточных дислокаций вдоль границ зерен или посредством движения зернограницных дислокаций, дает заметный вклад в общую деформацию.

Механизм диффузионной ползучести можно рассматривать как направленное перемещение отдельных атомов или поатомный процесс медленного удлинения образца под действием приложенного напряжения.

Очевидно, что для ответа на вопрос о механизмах ползучести данного материала необходимо непосредственное количественное изучение изменений структуры, сопровождающих ползучесть.

### **3. Методы измерения внутризеренной деформации**

Внутризеренную деформацию можно измерить с помощью маркерных линий-царапин или сеток, нанесенных на полированную поверхность образца до испытания, по линиям скольжения на поверхности предварительно полированного образца, и, используя анализ формы зерен как на поверхности образца, так и после перешлифовки в его «объеме». Методы определения внутризеренной деформации опираются на представления о том, что такая деформация растяжением всегда приводит к вытягиванию зерен. Если внутризеренная

деформация – единственный процесс, как, например, при комнатной температуре, то деформация каждого зерна должна быть равна деформации всего образца:

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \varepsilon_z \quad (6.3)$$

Это верно, пока в результате деформации не возникают поры и трещины на границах зерен. Поэтому совместность деформаций поликристаллического агрегата посредством внутризеренного течения возможна только при выполнении условия (6.3).

При высокотемпературных испытаниях, кроме внутризеренной деформации, наблюдается процесс, результат которого можно рассматривать как межзеренное скольжение (или «зернограничное проскальзывание») и который может быть реализован только в поликристаллическом агрегате зерен. Деформация межзеренным скольжением независимо от ее микромеханизма неоднородна в объеме поликристалла из-за разнообразной и неправильной формы зерен. В свою очередь это вызывает неоднородность внутризеренной деформации от зерна к зерну, поэтому в этом случае

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \overline{\varepsilon_z} + \varepsilon_{\text{ЗГС}}, \quad (6.4)$$

где  $\varepsilon_{\text{общ}}$  – деформация образца;

$\overline{\varepsilon_z}$  – средняя деформация зерен поликристалла;

$\varepsilon_{\text{ЗГС}}$  – деформация зернограничным скольжением.

Метод Речингера, опирающийся на последние рассуждения, использует анализ формоизменения зерен для оценки величины внутризеренной деформации. В образце с равноосной структурой в продольном и поперечном направлениях до деформации на единице длины располагается одинаковое число зерен  $n$ . Во время высокотемпературной деформации растяжением при условии постоянства объема образца зерна в среднем удлиняются в  $1 + \overline{\varepsilon_\zeta}$  раз, а поперечник их сокращается в  $\sqrt{1 + \varepsilon_\zeta}$  раз. Следовательно, в продольном направлении число зерен на единицу длины уменьшится, а в поперечном – увеличится в соответствующее число раз. Поскольку при высокой температуре испытания, кроме деформационного вытягивания зерен, может происходить направленный их рост (укрупнение), обусловленный хаотической миграцией границ, то число зерен на единицу длины как в продольном, так и в поперечном оси растяжения направлении должно уменьшиться в  $K$  раз, где  $K$  – фактор укрупнения зерен. Отсюда после деформации на единице длины в продольном направлении

$$N_l = \left( \frac{n}{K} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 + \varepsilon_\zeta} \right), \quad (6.5)$$

а в поперечном направлении

$$N_t = \left( \frac{n}{K} \right) \cdot \sqrt{1 + \varepsilon_\zeta}, \quad (6.6)$$

Комбинируя уравнения (6.5) и (6.6), получим:

$$\overline{\varepsilon_\zeta} = \left( \frac{N_t}{N_l} \right)^{\frac{2}{3}} - 1, \quad (6.7)$$

$$K = \frac{n}{\sqrt[3]{N_t^2 \cdot N_l}}. \quad (6.8)$$

Поскольку средний размер зерен в продольном или поперечном направлении – величина, обратная соответствующему числу зерен на единице длины, то уравнение (6.7) можно записать в виде:

$$\overline{\varepsilon_\zeta} = \left( \overline{L_l} / \overline{L_t} \right)^{2/3} - 1, \quad (6.9)$$

где  $\overline{L_l}$  и  $\overline{L_t}$  – средний размер зерен в продольном и поперечном направлениях, соответственно.

Таким образом, согласно уравнению (6.9), измеряя методом секущих средний размер зерен в продольном и поперечном направлениях после деформации, можно определить среднюю деформацию зерен, а если известен начальный размер зерна, то можно вычислить коэффициент ненаправленного роста зерна ( $K$ ).

Величины продольного и поперечного размеров зерен, измеренных с помощью секущих, зависят, с одной стороны – от распределения зерен по размерам, а с другой – от вариации получаемых при пересечении хорд, длины которых могут меняться от нуля до диаметра зерна. Иначе говоря, в сам метод измерения зерна заложен разброс данных. Поэтому для получения статистически значимого различия в величинах продольного и поперечного диаметров зерен в уравнении (6.9) часто необходимо произвести несколько сотен замеров. Сейчас это стало более достоверным при использовании компьютерных программ и приставок к сканирующему микроскопу для анализа картин дифракции обратно отраженных электронов (EBSD).

Для снижения трудоемкости и повышения точности результатов эксперимента предложено измерять отношение  $L_l/L_t$  для каждого зерна, т.е. выражение (6.9) приобретает следующий вид:

$$\overline{\varepsilon_\zeta} = \left( \overline{L_l} / \overline{L_t} \right)^{2/3} - 1. \quad (6.10)$$

Определение деформации каждого зерна и последующее усреднение позволяют уменьшить влияние распределения зерен по размерам и сократить число измерений.

Перечисленные недостатки отсутствуют, если определение внутризеренной деформации проводят по нанесенным предварительно на поверхность маркерным квадратным сеткам. Такие сетки должны иметь размеры ячеек, меньшие по сравнению с размерами зерен. Их наносят

царапанием, накаткой или напылением. Первые два способа нанесения маркеров могут искажать результат из-за локализованной микродеформации. В последние годы появилась возможность нанесения сеток без деформации и практически любых размеров бомбардировкой в ионном микроскопе. Расчеты внутризеренной деформации при использовании маркерных сеток можно проводить по уравнению (6.10), заменив значения продольного и поперечного размеров на длину и ширину соответственно деформированных ячеек сетки. К достоинствам метода сеток относят возможность анализа и учета неоднородности деформации.

Однако в большинстве случаев все методы маркеров оценивают деформацию центральной части зерен и не позволяют учесть деформацию, локализованную у границ зерен. Кроме того, метод сеток применим только для анализа деформационных процессов на поверхности образца, которые не всегда соответствуют таким процессам в его объеме. Если неоднородностью внутризеренной деформации можно пренебречь, то для измерения последней достаточно использовать серию поперечных маркеров, проведенных на одинаковом расстоянии ( $l_0$ ) один от другого (метод сеток), меньшем размера зерна. Тогда деформация каждого зерна вычисляется так же, как и деформация всего образца:

$$\varepsilon_{\zeta} = \frac{l_e - l_0}{l_0}. \quad (6.11)$$

Если поперечные маркеры проведены на образце случайным образом, то для вычисления по формуле (6.11) необходимо до деформации промерить начальное расстояние между маркерами.

Внутризеренная деформация на поверхности образца обычно проявляется в виде следов скольжения, которые также могут быть использованы для вычисления этой деформации. Если смещение, связанное с каждым следом скольжения, характеризуется вектором  $p$  (рис. 6.1), то деформацию, вызванную таким смещением, можно представить выражением:

$$\varepsilon_{\zeta} = \frac{\dot{a} - \dot{a}_0}{\dot{a}_0}. \quad (6.12)$$

Однако отрезок  $a$  после сдвига измерить не представляется возможным, поэтому выразим  $a$  через  $p$ . Используя теорему косинусов и принимая наиболее вероятный угол между направлением скольжения и осью растяжения  $\gamma = 45^\circ$ , получим

$$\varepsilon_{\zeta} = \frac{\dot{a} - \dot{a}_0}{\dot{a}_0} = \frac{\left( \sqrt{\dot{a}_0^2 + \dot{\delta}^2 + 2\dot{a}_0 \dot{\delta} \cos 45^\circ} - \dot{a}_0 \right)}{\dot{a}_0}. \quad (6.13)$$

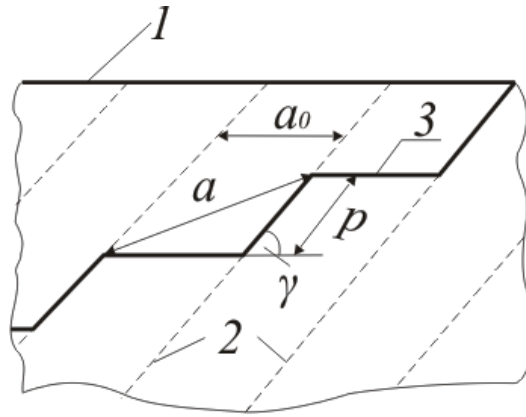


Рис. 6.1. Схема сдвигов при внутризеренном скольжении:

1 – исходная поверхность образца; 2 – плоскости скольжения на расстоянии  $a_0$ ; 3 – поверхность образца после деформации;  $a$  – расстояние между соседними следами скольжения на поверхности

Если на единицу длины исходного образца приходится  $n$  таких линий скольжения после определенной деформации  $\varepsilon_{\text{общ}}$ , то  $a_0 = 1/n$ . Поэтому

$$\varepsilon_{\zeta} = \left( \sqrt{1 + \delta^2 n^2} + \sqrt{2} \delta n - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (6.14)$$

или, упрощая далее, т.к.  $pn \ll 1$ ,

$$\varepsilon_{\zeta} = \left( \frac{\delta n}{\sqrt{2}} \right) \cdot 100\%. \quad (6.15)$$

Таким образом, зная вектор смещения  $p$  и число полос скольжения  $n$ , можно определить величину внутризеренной деформации. Однако  $n$  и  $p$  прямо измерить сложно.

Вектор смещения  $p$  можно выразить через  $h$  – перпендикуляр к плоскости поверхности образца (рис. 6.2). Величина вертикальной составляющей смещения  $h$  меняется от максимального значения при  $\beta = 90^\circ$  до минимального при  $\beta = 0^\circ$ . Из схемы на рис. 6.2 следует, что

$$h = p \sin \gamma \cdot \sin \beta. \quad (6.16)$$

Усредняя по возможным значениям углов  $\gamma$  и  $\beta$ , можно показать, что среднее смещение  $p$  и средняя величина вертикальной его составляющей  $h$  связаны отношением

$$\bar{p}/\bar{h} \approx 2,3. \quad (6.17)$$

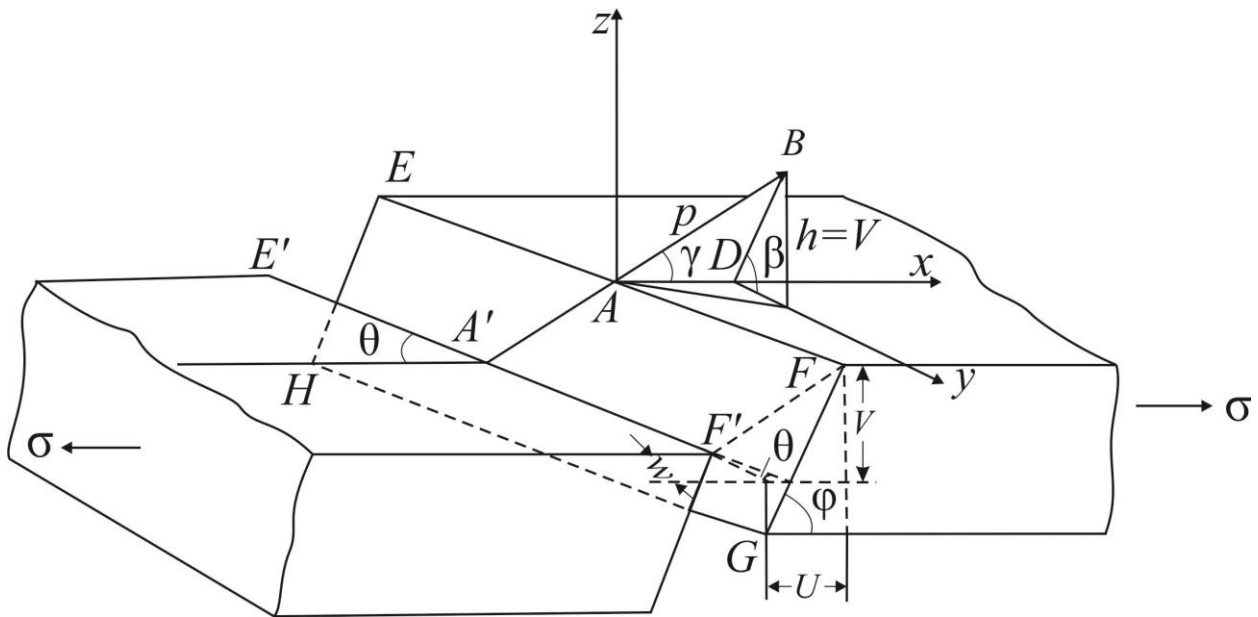


Рис. 6.2. Схема векторных соотношений при внутризеренном и межзеренном скольжении

Следует учесть, что высоту ступеньки  $h$ , возникающей на линии скольжения, измеряют перпендикулярно поверхности образца после некоторого удлинения  $\varepsilon_{\text{общ}}$ , а не перпендикулярно исходной поверхности. Так как толщина образца, а значит, и высота ступеньки при деформации растяжением на  $\varepsilon_{\text{общ}}$  уменьшается в  $\sqrt{1 + \varepsilon_{\text{ia}}}$  раз, окончательно получаем

$$\bar{p} = 2,3\bar{h}\sqrt{1 + \varepsilon_{\text{ia}}} . \quad (6.18)$$

Вертикальную составляющую смещения  $\bar{h}$  можно измерить при помощи интерферометра Линника МИИ-4 по смещению интерференционных полос. Оценка высоты ступенек проводится с помощью выражения

$$h = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{N_3 - N_4}{N_1 - N_2} \text{ (мкм)}, \quad (6.19)$$

где  $\lambda$  – длина волны света, используемого для освещения объекта;

$N_1 - N_2$  – расстояние между соседними интерференционными линиями;

$N_3 - N_4$  – смещение интерференционной полосы, например, полосы  $N_2$  при переходе через линию скольжения.

Метод линий скольжения при измерениях интерферометром позволяет оценить деформацию, если ступенька на поверхности у линии скольжения выше разрешающей способности прибора. Поэтому уравнением (6.14 или 6.15) оценивается деформация только от сравнительно грубых следов скольжения, а деформация в тонких следах скольжения, которая суммарно может составлять значительную долю, не учитывается.

Кроме того, в процессе деформирования далеко не все дислокации, движущиеся в металле, выходят на поверхность, образуя линии скольжения. Во время высокотемпературной

ползучести не только возрастает плотность дислокаций и происходит деформационное упрочнение, но и одновременно может протекать полигонизация, т.е. возврат с образованием развитой сетки малоугловых границ. Дислокации, не достигающие поверхности образца, участвуют в формировании малоугловых границ. Известно, что чем больше дислокаций в стенке, тем больше угол разворота соседних субзерен. Встраиваясь в стенку, дислокации увеличивают разворот субзерен, тем самым внося свою долю в общую деформацию образца. Эта доля внутризеренной деформации может быть оценена по углам разориентировки субзерен, измеряемым рентгеновскими способами.

Таким образом, метод линий скольжения оценивает не все составляющие внутризеренного скольжения, методы маркерных линий или царапин не учитывают скольжение, локализованное вблизи границ зерен, так как маркерные линии невозможно провести вплотную к границе, и только анализ формы зерен по своему физическому смыслу охватывает все деформационные процессы, протекающие внутри зерен, в том числе и диффузионную ползучесть, методы наблюдения которой весьма ограничены.

Диффузионная ползучесть может участвовать в деформации в сочетании с дислокационной ползучестью, внося самостоятельный вклад в общее удлинение. Рассматривая мысленно выделенное из поликристаллического агрегата квадратное зерно (рис. 6.3), можно показать, что на границах, поперечных оси растяжения, под действием нормальных растягивающих напряжений возникает избыточная концентрация вакансий. Градиент концентрации вакансий между продольными и поперечными границами вызывает поток атомов от сжатых продольных границ к поперечным через тело зерна или по его границам.

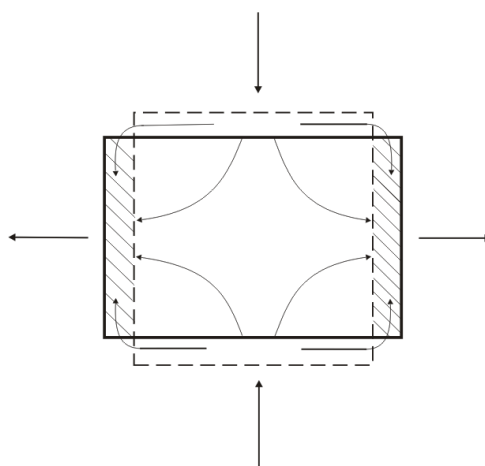


Рис. 6.3. Схема потоков вещества при диффузионной ползучести

В результате такого переноса атомов зерно увеличивается в длину и уменьшается в поперечнике, но это не вытягивание, тело зерна не деформируется. Если на полированной

поверхности такого зерна, меняющего размеры только за счет диффузионной ползучести, до деформации нанести две маркерных царапины  $mn$  и  $lk$ , то после деформации (рис. 6.4), когда зерно изменило свою форму, положение маркеров останется прежним.

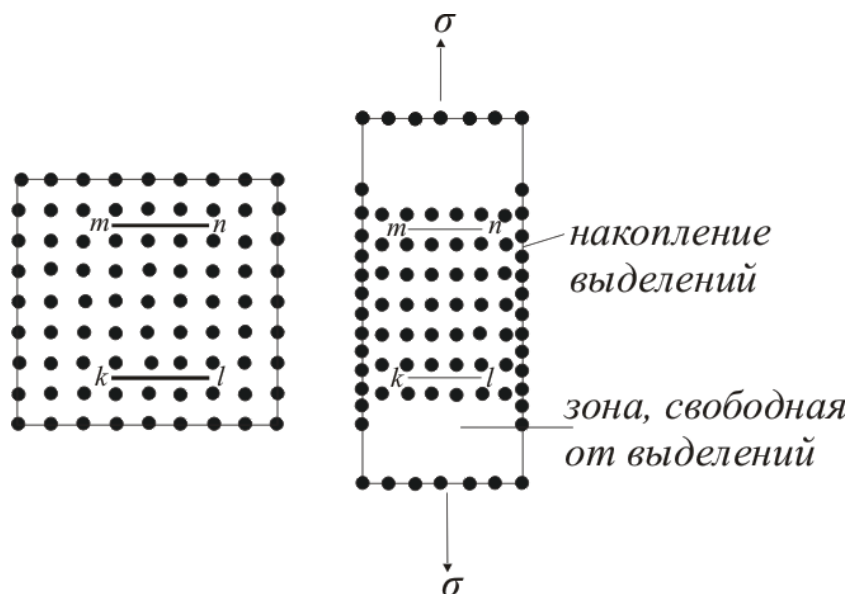


Рис. 6.4. Схема выявления диффузионной ползучести с помощью зон, свободных от выделений:  $mn$  и  $lk$  – маркерные царапины

Обнаружить диффузионную ползучесть можно, если в материале имеются равномерно распределенные инертные частицы – метки, например, гидриды циркония в магниевом сплаве. После деформации диффузионной ползучестью из-за перехода атомов от продольных границ к поперечным возле последних образуются зоны, свободные от выделений. У продольных границ, если они мигрируют со своих положений, плотность частиц должна возрасти. Мигрирующая граница зерна также может, оттесняя частицы, создавать зоны, свободные от выделений. Но только из-за диффузионной ползучести эти зоны возникают преимущественно на поперечных границах и могут образовываться с обеих сторон такой границы.

Деформацию образца из-за диффузионной ползучести можно определить по отношению средней ширины зон  $B_{зсв}$ , свободных от выделений, к среднему расстоянию между зонами  $L$  (измерения проводятся вдоль оси растяжения)

$$\varepsilon_{\text{дд}} = \overline{B_{\text{зсв}}} / \overline{L}.$$

Вклад ( $\gamma$ ) того или иного механизма в общее удлинение определяют как отношение величины деформации данным механизмом к величине общего удлинения в процентах. Следует заметить, что методы маркеров, линий скольжения и зон, свободных от выделений, позволяют оценивать вклады от отдельных составляющих внутризеренной деформации, тогда



как метод анализа формы зерен оценивает совокупную деформацию зерна, не различая микромеханизмы.

#### 4. Методы измерения межзеренной деформации

Плоскость  $EFGH$  на рис. 6.2 можно рассматривать как плоскость границы между двумя зернами, по которой произошел межзеренный сдвиг. Полный вектор смещения из-за межзеренного сдвига  $FF'$  (или  $AA'$ ) имеет три проекции на координатные оси: продольная составляющая смещения, параллельная оси растяжения  $U$ , поперечная составляющая смещения, параллельная оси  $Y-W$ , и вертикальная составляющая смещения, параллельная оси  $Z - V=h$ . Последнее равенство имеет тот смысл, что вертикальная составляющая межзеренной деформации  $h$  образует на границе зерен ступеньку, подобную рассмотренной выше ступеньке на линиях скольжения при внутризеренной деформации. Поэтому выведенные выше уравнения (6.14, 6.15 и 6.18) полностью применимы и для определения межзеренной деформации, если интерферометром измеряют высоту ступеньки на границах зерен, или строить профилограмму поверхности с помощью современного сканирующего микроскопа.

Анализ форм зерен, рассмотренный выше, был предложен Речингером для определения величины межзеренной деформации. В соответствии выражением (6.4)

$$\varepsilon_{\zeta\bar{A}\bar{N}} = \varepsilon_{i\bar{A}\bar{U}} - \bar{\varepsilon}_{\zeta},$$

где деформация зерна  $\bar{\varepsilon}_{\zeta}$  определена по изменению формы зерен или методами маркеров.

Методы маркерных царапин или сеток также широко применяют для измерения величины межзеренного скольжения (рис. 6.5), используя возникающие при этом смещения или разрывы маркерных царапин на границах зерен.

Основные трудности при анализе механизмов горячей деформации, в особенности процессов межзеренного скольжения, связаны с изменением структуры металла при нагреве, например, с миграцией границ зерен, которая по-разному протекает в объеме и на поверхности образца, с одной стороны, и с различным деформационным поведением поверхности и объема образца, с другой.

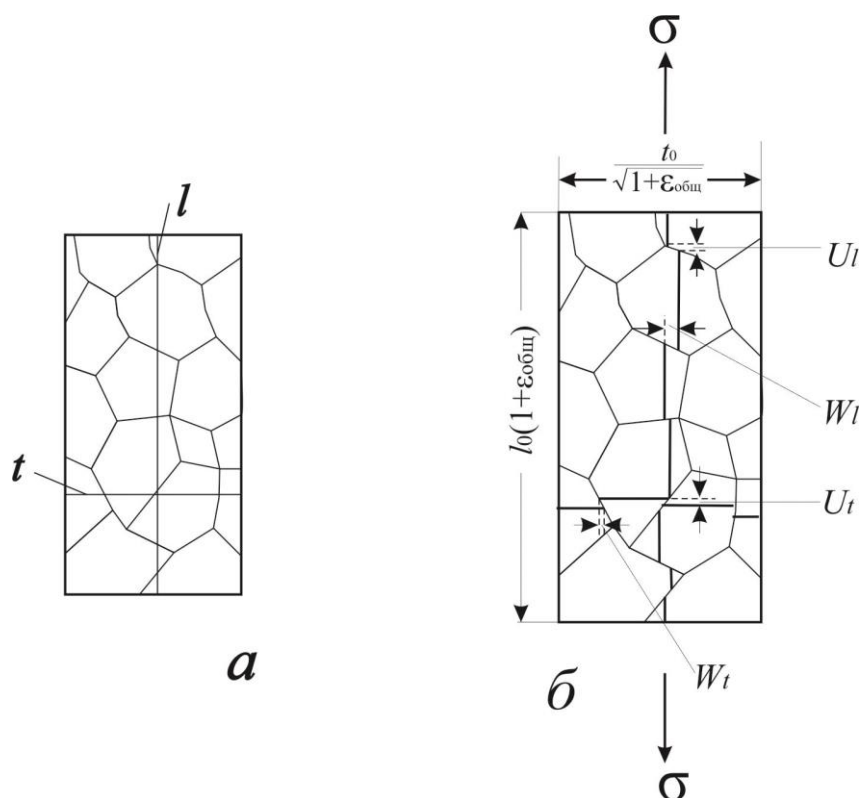


Рис. 6.5. Поверхность поликристаллического образца с выявленной микроструктурой и нанесенными продольной  $l$  и поперечной  $t$  рисками в исходном состоянии (а) и после высокотемпературной ползучести (б)

Очевидно, что измерения в объеме образца наиболее объективно характеризуют происходящие в металле процессы деформации. Анализ формы зерен, позволяющий проводить такие исследования после переполировки образца в его объеме, имеет ряд недостатков, рассмотренных выше. Самым надежным для изучения межзеренной деформации считается метод внутренних маркеров, использующий строчечные включения неметаллических частиц (в сталях) или строчки оксидов (оксид алюминия в алюминиевых сплавах). Для введения строчек оксидов применяют горячую прокатку многослойной заготовки исследуемого сплава, так как на поверхности алюминиевых сплавов имеется тонкий слой оксида. Поскольку методы внутренних маркеров применимы к ограниченному числу материалов, исследования на поверхности образцов сохраняют свою ценность, но требуют анализа соответствия оценок на поверхности и в объеме образца.

Эксперименты, в которых параллельно применяли методы внутренних маркерных царапин, не всегда демонстрировали соответствие данных, полученных при измерениях на поверхности и в объеме образца. Действительно, на поверхности образца другие условия совместности деформации зерен из-за влияния свободных поверхностей. Эти поверхности отличаются иным распределением и плотностью дислокаций и точечных дефектов, и, наконец,

углы плоскостей границ зерен с осью растяжения в центре образца и у его поверхности могут различаться.

Последнее связано с тем, что миграция приводит границы в разные равновесные положения на поверхности и в объеме образца. Если в объеме образца после миграции границ нормали к их плоскостям составляют любые углы с осью растяжения, то в поверхностном слое плоскости становятся примерно перпендикулярно свободной поверхности. След таких границ на боковой поверхности образца (см. рис. 6.2)  $FG$  образует с осью растяжения углы  $\varphi$  в интервале от  $35$  до  $90^\circ$  ( $\bar{\varphi} = 77^\circ$ ), в этом случае поверхность образца называют «отожженной». Если поверхностный слой образца удален шлифовкой или полировкой, то границы на боковой поверхности можно наблюдать под углами  $\varphi$  от  $0$  до  $90^\circ$  ( $\bar{\varphi} = 58^\circ$ ). Такую поверхность называют «свежей». Следует отметить, что на «свежую» и на «отожженную» поверхность границы зерен выходят под углами  $\theta$  (рис. 6.2), одинаково варьирующимися от  $0$  до  $90^\circ$ . Если в объеме образца вдоль оси растяжения мысленно провести две пересекающиеся плоскости, параллельные рассматриваемым поверхностям образца, то эти мысленные плоскости будут встречаться с границами зерен по углам  $\varphi$  и  $\theta$ , меняющимися от  $0$  до  $90^\circ$  равновероятно. Кроме того, в объеме образца смысловое различие между углами  $\varphi$  и  $\theta$ , а также между поперечными смещениями зерен  $V$  и  $W$  отсутствует.

У образцов со «свежей» поверхностью при малых степенях деформации или, если миграция границ в этих образцах по каким-либо причинам затруднена, величины межзеренной деформации одинаковы как при измерениях в объеме, так и на поверхности образца.

Из чисто геометрических соображений при отсутствии миграции границ зерен величину межзеренной деформации можно было бы определять по продольным смещениям продольных царапин  $U_l$  (рис. 6.5). Для этого необходимо проводить замеры  $U_l$  последовательно вдоль маркерной линии, фиксируя число измеренных смещений, чтобы определить число смещений на единице длины  $n_l = N/L$ , где  $N$  – число границ со смещением царапин, а  $L$  – длина проанализированного участка царапины. Величину межзеренной деформации можно определить по формуле:

$$\varepsilon_{\text{CAN}} = \frac{\sum_{i=1}^N U_l}{L_0} = \frac{(1 + \varepsilon_{\text{ia}}) \sum_{i=1}^N U_l}{L} = (1 + \varepsilon_{\text{ia}}) n_l \cdot \bar{U}_l, \quad (6.20)$$

где  $L_0$  – начальная длина царапины до деформации;

член  $(1 + \varepsilon_{\text{ia}})$  введен для приведения длины исследованного после деформации маркера к его начальной длине;

$\bar{U}_l$  – среднее продольное смещение маркера на границах зерен.

Продольные маркеры чаще всего пересекают поперечные границы зерен, на некоторых наблюдается миграция и другие изменения, связанные с деформацией, поэтому величину смещения  $\overline{U}_l$  обычно трудно измерить точно. С большой точностью можно измерять продольные смещения поперечных царапин  $U_l$  (рис. 6.5) и использовать их в выражении (6.20), считая с некоторым допущением, что  $\overline{U}_l = \overline{U}_t$ . Но главное, получаемая величина  $\varepsilon_{ГС}$  не соответствует процессам в объеме образца. Из схемы на рис. 6.2 следует:

$$U_l = \left( \frac{W}{\operatorname{tg}\theta} \right)_l + \left( \frac{V}{\operatorname{tg}\theta} \right)_l, \quad (6.21)$$

где индекс  $l$  означает измерения по продольным маркерам. В объеме образца или, если образец со «свежей» поверхностью

$$\frac{W}{\operatorname{tg}\theta} = \frac{V}{\operatorname{tg}\varphi}, \quad (6.22)$$

но при миграции границ зерен во время деформации или у образца с «отожженной» поверхностью равенство (6.22) вблизи поверхности не должно выполняться из-за изменений в распределении углов  $\varphi$  и иных значений смещения  $V$ . Иначе говоря,  $U_l \text{ поверх} \neq U_l \text{ объемн}$  по геометрическим соображениям, тогда как

$$\left( \frac{W}{\operatorname{tg}\theta} \right)_{l \text{ в } \text{объемн}} = \left( \frac{W}{\operatorname{tg}\theta} \right)_{l \text{ на } \text{поверхн}}. \quad (6.23)$$

Поэтому опираясь на уравнения (6.21) и (6.22), сопоставимые значения межзеренной деформации как в объеме, так и на поверхности образца должны получаться по уравнению:

$$\varepsilon_{\text{ГЗН}} = 2(1 + \varepsilon_{\text{ГЗН}}) \cdot n_l (\overline{W}_l / \operatorname{tg}\theta), \quad (6.24)$$

где  $W_l$  – поперечное смещение продольной царапины (рис. 6.5).

Последнее выражение позволяет избежать влияния состояния поверхности на результат измерений, но и этот подход имеет недостатки. Необходимо измерять два параметра – смещение и угол границы с осью растяжения. Из-за сложности геометрии реальной структуры точность измерения межзеренной деформации  $\pm 17-25$  % от среднего значения при уровне значимости 95%, если проводить 200-300 измерений каждого параметра ( $W_l$  и  $\theta$ ).

Имеются экспериментальные данные, полученные при исследовании ползучести алюминиевых бронз, согласно которым у образцов с «отожженной» поверхностью уравнение (6.24) примерно на 20 % завышает величину межзеренной деформации по сравнению с результатами таких же замеров по внутренним меткам. Это объясняется тем, что приведенный выше вывод уравнения (6.24) основан только на сохранении одинакового распределения углов  $\theta$  на поверхности и в объеме образца. Но из-за иного распределения углов  $\varphi$ , отвечающего «отожженной» поверхности, возникает такое распределение сдвигающих напряжений, при

котором проскальзывание зерен у поверхности образца осуществляется в основном смещениями  $W$ , смещения же  $V$  очень малы. Поэтому при измерении на поверхности уравнение (6.24) дает завышенный результат, а по уравнению:

$$\varepsilon_{\text{CAN}} = (1 + \varepsilon_{\text{ia}}) n_l \left[ \left( \frac{W}{\text{tg}\theta} \right)_l + \left( \frac{V}{\text{tg}\varphi} \right)_l \right], \quad (6.25)$$

результаты совпадают с измерениями в объеме образца, при которых использовали уравнение (6.24).

Недостаточная точность результатов определения  $\varepsilon_{\text{ЗГС}}$ , а также расхождение экспериментальных данных и теоретических соотношений, выведенных из геометрических соображений, позволяет рассматривать получаемые данные только как полуколичественные. Поэтому для определения величины межзеренной деформации могут быть применены другие, более простые эмпирические уравнения:

$$\varepsilon_{\text{CAN}} = K' \cdot n_l \cdot \overline{W}_l, \quad (6.26)$$

$$\varepsilon_{\text{CAN}} = K \cdot n_l \cdot \overline{V}_{l,r}, \quad (6.27)$$

где  $K$  и  $K'$  – эмпирические константы, а индекс  $r$  означает проведение измерений только одного параметра  $W$  или  $V$ , причем в последнем случае удобно применять интерферометр и производить измерения случайным образом. Постоянные  $K$  и  $K'$  в уравнениях (6.26) и (6.27) зависят от материала и его состояния, и, строго говоря, в каждом случае должны быть определены экспериментально, используя данные, полученные с помощью внутренних маркеров. При проведении оценочных измерений можно использовать для «свежей» поверхности  $K = 1,1$ , а для «отожженной»  $K = 1,4$ , наблюдавшиеся экспериментально у целого ряда материалов. Константу  $K'$  можно принять равной 1,5 в соответствии с экспериментальными данными и данными расчета по функциональной зависимости  $W_l$  от  $\theta$ .

Вклад зернограницного скольжения  $\varepsilon_{\text{ЗГС}}$  в общее удлинение образца определяется по формуле

$$\gamma_{\text{CAN}} = \left( \frac{\varepsilon_{\text{CAN}}}{\varepsilon_{\text{ia}}} \right) \cdot 100\% .$$

## 5. Описание установки

В микроинтерферометре Линника луч от лампы с длиной волны, заданной соответствующим фильтром, разделяется на два, первый из которых формирует изображение объекта в окуляре. Второй луч после прохождения через полупрозрачные пластинки и отражения от эталонного зеркала приобретает разность хода по отношению к первому лучу и затем, накладываясь на изображение от первого луча, формирует в окуляре изображение эталонной поверхности.

В результате, если исследуемая поверхность оптически плоская, то из-за разности хода двух частей одного пучка должна возникать интерференция: чередование максимумов освещенности. Меняя угол наклона между изображениями эталонной и исследуемой поверхностей, можно регулировать ширину полос и интервала между ними. Расстояние между двумя соседними темными и светлыми полосами отвечает разности хода, равной половине длины волны используемого света. Интерференционные полосы изгибаются на ступеньках рельефа, по величине изгиба (смещения) легко судить о разности уровней.

Двухлучевой интерферометр позволяет измерять высоту неровностей поверхности, превышающих 50 нм. Многолучевой интерферометр, в котором используется многократное отражение лучей, формирующих изображение, в воздушном зазоре между двумя полупосеребренными пластинками, имеет интерференционную картину из очень тонких линий – интерференционных максимумов. Поэтому чувствительность и точность метода увеличивается в десятки раз, этот прибор фиксирует минимальную разность высот 2-5 нм.

## 6. Порядок выполнения работы

1. Получить от преподавателя первичные данные испытаний на ползучесть нескольких сплавов и построить по ним кривые ползучести. Оценить по кривым скорость установившейся ползучести.

2. Построить в логарифмических координатах зависимость скорости установившейся ползучести от приложенного напряжения и определить условный предел ползучести

3. Ознакомиться с устройством и правилами пользования микроинтерферометром

4. Провести измерения вертикальной составляющей смещения в следах скольжения и на границах зерен с помощью интерферометра

5. Определить внутризеренную деформацию анализом формы зерен и по увеличению расстояния между поперечными маркерами

6. Определить величину межзеренной деформации по замерам поперечных смещений продольных маркеров

Количество измерений во всех случаях указывается преподавателем.

### **7. Требования к отчету**

1. Представить конспект основных теоретических положений с таблицей основных расчетных формул.
2. Экспериментальные результаты по каждому методу представить в виде таблиц, в которых должны быть отражены первичные результаты замеров и последовательный ход расчета до конечных средних значений.
3. Зарисовать типичные структурные изменения, вызванные деформацией.
4. Сопоставить результаты измерений, полученные разными методами, и дать им объяснения.

### **8. Литература**

1. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. С. 303-308.

### **9. Контрольные вопросы**

1. Каковы отличительные особенности внутризеренного скольжения при ползучести?
2. Как проявляется в объеме материала и на его поверхности внутризеренная деформация при ползучести?
3. Объясните микромеханизмы межзеренной деформации.
4. В чем принципиальное отличие микромеханизма диффузионной ползучести от дислокационной ползучести?
5. Перечислите методы определения величины внутризеренной деформации.
6. Какое основное положение лежит в основе методов определения внутризеренной деформации?
7. На какие составляющие можно подразделить общую деформацию при ползучести?
8. В чем сущность метода определения внутризеренной деформации по Речингеру?
9. Выведите расчетную формулу для определения величины внутризеренной деформации с помощью анализа форм зерен?

10. Каковы недостатки метода анализа форм зерен?
11. В чем сущность оценки внутризеренной деформации методом маркеров?
12. Укажите достоинства и недостатки метода маркеров для определения величины внутризеренной деформации.
13. На чем основан метод определения величины внутризеренной деформации по следам скольжения?
14. Приведите расчетные выражения для определения величины внутризеренной деформации по следам скольжения.
15. Опишите принцип действия двухлучевого интерферометра?
16. За счет чего повышена разрешающая способность многолучевого интерферометра?
17. Каковы недостатки определения величины внутризеренной деформации по следам скольжения?
18. Сопоставьте достоинства и недостатки основных методов определения величины внутризеренной деформации.
19. В чем сущность микромеханизма диффузионной ползучести?
20. Как экспериментально структурным анализом можно обнаружить диффузионную ползучесть?
21. Какие методы используют для оценки межзеренной деформации?
22. Каковы причины возможного несоответствия данных о величине межзеренной деформации, полученных разными методами?
23. В чем сущность метода оценки межзеренной деформации, считающегося самым объективным?
24. В чем сущность понятия «отожженная» и «свежая» поверхность?
25. Объясните, по каким причинам расчет межзеренной деформации по продольному смещению маркеров, параллельных оси растяжения, может давать неверные результаты.
26. Каким образом по смещению маркеров можно получить объективные данные о величине зернограницного скольжения?
27. Объясните причины несоответствия данных о величине зернограницного скольжения, получаемых по поперечным смещениям продольных маркеров в объеме и на поверхности образца.
28. Каковы способы приближенной оценки величины зернограницного скольжения и его вклада в общую деформацию?



Таблица П.1 – Таблица перевода чисел твердости

Твердость по Роквеллу		Твердость по Виккерсу, <i>HV</i>	Твердость по Бринеллю, <i>HB</i>
<i>HRC</i>	<i>HRA</i>		
70	86,5	1076	-
69	86,0	1004	-
68	85,5	942	-
67	85,0	894	-
66	84,5	854	-
65	84,0	820	-
64	83,5	787	-
63	83,0	763	-
62	82,5	739	-
61	81,5	715	-
60	81,0	695	-
59	80,5	675	-
58	80,0	655	-
57	79,5	636	-
56	79,0	617	-
55	78,5	598	-
54	78,0	580	-
53	77,5	562	-
52	77,0	545	-
51	76,5	528	-
50	76,0	513	-
49	75,5	498	-
48	74,5	485	-
47	74,0	471	448
46	73,5	458	437
45	73,0	446	426
44	72,5	435	415
42	71,5	413	393
40	70,5	393	372
38	-	373	352
36	-	353	333
34	-	334	313
32	-	317	297
30	-	301	283
28	-	285	270
26	-	271	260
24	-	257	250
22	-	246	240
20	-	236	230

Продолжение табл. П.1

Твердость по Роквеллу, <i>HRB</i>	Твердость по Бринеллю, <i>HB</i>	Твердость по Роквеллу, <i>HRB</i>	Твердость по Бринеллю, <i>HB</i>
100	240	83	159
99	234	82	156
98	228	81	153
97	222	80	150
96	216	79	147
95	210	78	144
94	205	77	141
93	200	76	139
92	195	75	137
91	190	74	135
90	185	72	130
89	180	70	125
88	176	68	121
87	172	66	117
86	169	64	114
85	165	62	110
84	162	60	107

Таблица П.2 – Числа твердости по Бринеллю

Диаметр отпечатка (мм) $d_{10}$ или $2d_5$ или $4d_{2,5}$	Число твердости по Бринеллю при нагрузке $P$ (кгс), равной:			Диаметр отпечатка (мм) $d_{10}$ или $2d_5$ или $4d_{2,5}$	Число твердости по Бринеллю при нагрузке $P$ (кгс), равной:		
	$30D^2$	$10D^2$	$2,5D^2$		$30D^2$	$10D^2$	$2,5D^2$
1	2	3	4	5	6	7	8
2,50	601	200	50,1	2,88	451	150	37,6
2,51	597	199	49,7	2,89	448	149	37,3
2,52	592	197	49,3	2,90	444	148	37,0
2,53	587	196	48,9	2,91	441	147	36,8
2,54	582	194	48,5	2,92	438	146	36,5
2,55	578	193	48,1	2,93	435	145	36,3
2,56	573	191	47,8	2,94	432	144	36,0
2,57	569	190	47,4	2,95	429	143	35,8
2,58	564	188	47,0	2,96	426	142	35,5
2,59	560	187	46,6	2,97	423	141	35,3
2,60	555	185	46,3	2,98	420	140	35,0
2,61	551	184	45,9	2,99	417	139	34,8
2,62	547	182	45,6	3,00	415	138	34,6
2,63	543	181	45,2	3,01	412	137	34,3
2,64	538	179	44,9	3,02	409	136	34,1
2,65	534	178	44,5	3,03	406	135	33,9
2,66	530	177	44,2	3,04	404	135	33,6
2,67	526	175	43,8	3,05	401	134	33,4
2,68	522	174	43,5	3,06	398	133	33,2
2,69	518	173	43,2	3,07	395	132	33,0
2,70	514	171	42,9	3,08	393	131	32,7
2,71	510	170	42,5	3,09	390	130	32,5
2,72	507	169	42,2	3,10	388	129	32,3
2,73	503	168	41,9	3,11	385	128	32,1
2,74	499	166	41,6	3,12	383	128	31,9
2,75	495	165	41,3	3,13	380	127	31,7
2,76	492	164	41,0	3,14	378	126	31,5
2,77	488	163	40,7	3,15	375	125	31,3
2,78	485	162	40,4	3,16	373	124	31,1
2,79	481	160	40,1	3,17	370	123	30,9
2,80	477	159	39,8	3,18	368	123	30,7
2,81	474	158	39,5	3,19	366	122	30,5
2,82	471	157	39,2	3,20	363	121	30,3
2,83	467	156	38,9	3,21	361	120	30,1
2,84	464	155	38,7	3,22	359	120	29,9
2,85	461	154	38,4	3,23	356	119	29,7
2,86	457	152	38,1	3,24	354	118	29,5
2,87	454	151	37,8	3,25	352	117	29,3

Продолжение табл. П.2

1	2	3	4	5	6	7	8
3,26	350	117	29,1	3,71	268	89,2	22,3
3,27	347	116	29,0	3,72	266	88,7	22,2
3,28	345	115	28,8	3,73	265	88,2	22,1
3,29	343	114	28,6	3,74	263	87,7	21,9
3,30	341	114	28,4	3,75	262	87,2	21,8
3,31	339	113	28,2	3,76	260	86,8	21,7
3,32	337	112	28,1	3,77	259	86,3	21,6
3,33	335	112	27,9	3,78	257	85,8	21,5
3,34	333	111	27,7	3,79	256	85,3	21,3
3,35	331	110	27,5	3,80	255	84,9	21,2
3,36	329	110	27,4	3,81	253	84,4	21,1
3,37	326	109	27,2	3,82	252	83,9	21,0
3,38	325	108	27,0	3,83	250	83,5	20,9
3,39	323	108	26,9	3,84	249	83,0	20,8
3,40	321	107	26,7	3,85	248	82,6	20,6
3,41	319	106	26,6	3,86	246	82,1	20,5
3,42	317	106	26,4	3,87	245	81,7	20,4
3,43	315	105	26,2	3,88	244	81,3	20,3
3,44	313	104	26,1	3,89	242	80,8	20,2
3,45	311	104	25,9	3,90	241	80,4	20,1
3,46	309	103	25,8	3,91	240	80,0	20,0
3,47	307	102	25,6	3,92	239	79,5	19,9
3,48	306	102	25,5	3,93	237	79,1	19,8
3,49	304	101	25,3	3,94	236	78,7	19,7
3,50	302	101	25,2	3,95	235	78,3	19,6
3,51	300	100	25,0	3,96	234	77,9	19,5
3,52	298	99,5	24,9	3,97	232	77,5	19,4
3,53	297	98,9	24,7	3,98	231	77,1	19,3
3,54	295	98,3	24,6	3,99	230	76,7	19,2
3,55	293	97,7	24,4	4,00	229	76,3	19,1
3,56	292	97,2	24,3	4,01	228	75,9	19,0
3,57	290	96,6	24,2	4,02	226	75,5	18,9
3,58	288	96,1	24,0	4,03	225	75,1	18,8
3,59	286	95,5	23,9	4,04	224	74,7	18,7
3,60	285	95,0	23,7	4,05	223	74,3	18,6
3,61	283	94,4	23,6	4,06	222	73,9	18,5
3,62	282	93,9	23,5	4,07	221	73,5	18,4
3,63	280	93,3	23,3	4,08	219	73,2	18,3
3,64	278	92,8	23,2	4,09	218	72,8	18,2
3,65	277	92,3	23,1	4,10	217	72,4	18,1
3,66	275	91,8	22,9	4,11	216	72,0	18,0
3,67	274	91,2	22,8	4,12	215	71,7	17,9
3,68	272	90,7	22,7	4,13	214	71,3	17,8
3,69	271	90,2	22,6	4,14	213	71,0	17,7
3,70	269	89,7	22,4	4,15	212	70,6	17,6

Продолжение табл. П.2

1	2	3	4	5	6	7	8
4,16	211	70,2	17,6	4,62	169	56,3	14,1
4,17	210	69,9	17,5	4,63	168	56,0	14,0
4,18	209	69,5	17,4	4,64	167	55,8	13,9
4,19	208	69,2	17,3	4,65	167	55,5	13,9
4,20	207	68,8	17,2	4,66	166	55,3	13,8
4,21	205	68,5	17,1	4,67	165	55,0	13,8
4,22	204	68,2	17,0	4,68	164	54,8	13,7
4,23	203	67,8	17,0	4,69	164	54,5	13,6
4,24	202	67,5	16,9	4,70	163	54,3	13,6
4,25	201	67,1	16,8	4,71	162	54,0	13,5
4,26	200	66,8	16,7	4,72	161	53,8	13,4
4,27	199	66,5	16,6	4,73	161	53,5	13,4
4,28	198	66,2	16,5	4,74	160	53,3	13,3
4,29	198	65,8	16,5	4,75	159	53,0	13,3
4,30	197	65,5	16,4	4,76	158	52,8	13,2
4,31	196	65,2	16,3	4,77	158	52,6	13,1
4,32	195	64,9	16,2	4,78	157	52,3	13,1
4,33	194	64,6	16,1	4,79	156	52,1	13,0
4,34	193	64,2	16,1	4,80	156	51,9	13,0
4,35	192	63,9	16,0	4,81	155	51,6	12,9
4,36	191	63,6	15,9	4,82	154	51,4	12,9
4,37	190	63,3	15,8	4,83	154	51,2	12,8
4,38	189	63,0	15,8	4,84	153	51,0	12,7
4,39	188	62,7	15,7	4,85	152	50,7	12,7
4,40	187	62,4	15,6	4,86	152	50,5	12,6
4,41	186	62,1	15,5	4,87	151	50,3	12,6
4,42	185	61,8	15,5	4,88	150	50,1	12,5
4,43	185	61,5	15,4	4,89	150	49,8	12,5
4,44	184	61,2	15,3	4,90	149	49,6	12,4
4,45	183	60,9	15,2	4,91	148	49,4	12,4
4,46	182	60,6	15,2	4,92	148	49,2	12,3
4,47	181	60,4	15,1	4,93	147	49,0	12,2
4,48	180	60,1	15,0	4,94	146	48,8	12,2
4,49	179	59,8	14,9	4,95	146	48,6	12,1
4,50	179	59,5	14,9	4,96	145	48,3	12,1
4,51	178	59,2	14,8	4,97	144	48,1	12,0
4,52	177	59,0	14,7	4,98	144	47,9	12,0
4,53	176	58,7	14,7	4,99	143	47,7	11,9
4,54	175	58,4	14,6	5,00	143	47,5	11,9
4,55	174	58,1	14,5	5,01	142	47,3	11,8
4,56	174	57,9	14,5	5,02	141	47,1	11,8
4,57	173	57,6	14,4	5,03	141	46,9	11,7
4,58	172	57,3	14,3	5,04	140	46,7	11,7
4,59	171	57,1	14,3	5,05	140	46,5	11,6
4,60	170	56,8	14,2	5,06	139	46,3	11,6
4,61	170	56,5	14,1	5,07	138	46,1	11,5

Продолжение табл. П.2

1	2	3	4	5	6	7	8
5,08	138	45,9	11,5	5,55	114	37,9	9,47
5,09	137	45,7	11,4	5,56	113	37,7	9,43
5,10	137	45,5	11,4	5,57	113	37,6	9,39
5,11	136	45,3	11,3	5,58	112	37,4	9,35
5,12	135	45,1	11,3	5,59	112	37,3	9,32
5,13	135	45,0	11,2	5,60	111	37,1	9,28
5,14	134	44,8	11,2	5,61	111	37,0	9,24
5,15	134	44,6	11,1	5,62	110	36,8	9,21
5,16	133	44,4	11,1	5,63	110	36,7	9,17
5,17	133	44,2	11,1	5,64	110	36,5	9,14
5,18	132	44,0	11,0	5,65	109	36,4	9,10
5,19	132	43,8	11,0	5,66	109	36,3	9,06
5,20	131	43,7	10,9	5,67	108	36,1	9,03
5,21	130	43,5	10,9	5,68	108	36,0	8,99
5,22	130	43,3	10,8	5,69	107	35,8	8,96
5,23	129	43,1	10,8	5,70	107	35,7	8,92
5,24	129	42,9	10,7	5,71	107	35,6	8,89
5,25	128	42,8	10,7	5,72	106	35,4	8,85
5,26	128	42,6	10,6	5,73	106	35,3	8,82
5,27	127	42,4	10,6	5,74	105	35,1	8,79
5,28	127	42,2	10,6	5,75	105	35,0	8,75
5,29	126	42,1	10,5	5,76	105	34,9	8,72
5,30	126	41,9	10,5	5,77	104	34,7	8,68
5,31	125	41,7	10,4	5,78	104	34,6	8,65
5,32	125	41,5	10,4	5,79	103	34,5	8,62
5,33	124	41,4	10,3	5,80	103	34,3	8,59
5,34	124	41,2	10,3	5,81	103	34,2	8,55
5,35	123	41,0	10,3	5,82	102	34,1	8,52
5,36	123	40,9	10,2	5,83	102	33,9	8,49
5,37	122	40,7	10,2	5,84	101	33,8	8,45
5,38	122	40,5	10,1	5,85	101	33,7	8,42
5,39	121	40,4	10,1	5,86	101	33,6	8,39
5,40	121	40,2	10,1	5,87	100	33,4	8,36
5,41	120	40,0	10,0	5,88	99,9	33,3	8,33
5,42	120	39,9	9,97	5,89	99,5	33,2	8,30
5,43	119	39,7	9,93	5,90	99,2	33,1	8,26
5,44	119	39,6	9,89	5,91	98,8	32,9	8,23
5,45	118	39,4	9,85	5,92	98,4	32,8	8,20
5,46	118	39,2	9,81	5,93	98,0	32,7	8,17
5,47	117	39,1	9,77	5,94	97,7	32,6	8,14
5,48	117	38,9	9,73	5,95	97,3	32,4	8,11
5,49	116	38,8	9,69	5,96	96,9	32,3	8,08
5,50	116	38,6	9,66	5,97	96,6	32,2	8,05
5,51	115	38,5	9,62	5,98	96,2	32,1	8,02
5,52	115	38,3	9,58	5,99	95,9	32,0	7,99
5,53	114	38,2	9,54	6,00	95,5	31,8	7,96
5,54	114	38,0	9,50				

Таблица П.3 – Числа твердости по Виккерсу. Нагрузка 10 кгс

Диагональ отпечатка, мм	0,000	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,10	1854	1817	1782	1748	1714	1682	1650	1619	1590	1560
0,11	1532	1505	1478	1452	1427	1402	1378	1354	1332	1309
0,12	1288	1266	1246	1225	1206	1187	1168	1149	1132	1114
0,13	1097	1080	1064	1048	1033	1017	1002	988	974	960
0,14	946	933	919	907	894	882	870	858	846	835
0,15	824	813	802	792	782	772	762	752	743	733
0,16	724	715	706	698	689	681	673	665	657	649
0,17	642	634	627	619	612	605	599	592	585	579
0,18	572	566	560	554	548	542	536	530	525	519
0,19	514	508	503	498	493	488	483	478	473	468
0,20	464	459	454	450	446	441	437	433	429	424
0,21	420	416	413	409	405	401	397	394	390	387
0,22	383	380	376	373	369	366	363	360	357	354
0,23	350	347	344	342	339	336	333	330	327	325
0,24	322	319	317	314	311	309	306	304	301	299
0,25	297	294	292	290	287	285	283	281	279	276
0,26	274	272	270	268	266	264	262	260	258	256
0,27	254	252	251	249	247	245	243	242	240	238
0,28	236	235	233	231	230	228	227	225	224	222
0,29	220	219	217	216	214	213	212	210	209	207
0,30	206	205	203	202	201	199	198	197	195	194
0,31	193	192	190	189	188	187	186	184	183	182
0,32	181	180	179	178	177	176	174	173	172	171
0,33	170	169	168	167	166	165	164	163	162	161
0,34	160,4	159,4	158,5	157,6	156,7	155,8	154,9	154,0	153,1	152,2
0,35	151,3	150,5	149,6	148,8	147,9	147,1	146,3	145,5	144,7	143,9
0,36	143,1	142,3	141,5	140,7	139,9	139,2	138,4	137,7	136,9	136,2
0,37	135,4	134,7	134,0	133,3	132,5	131,8	131,1	130,4	129,8	129,1
0,38	128,4	127,7	127,1	126,4	125,7	125,1	124,4	123,8	123,2	122,5
0,39	121,9	121,3	120,7	120,0	119,4	118,8	118,2	117,6	117,0	116,5
0,40	115,9	115,3	114,7	114,2	113,6	113,0	112,5	111,9	111,4	110,8
0,41	110,3	109,8	109,2	108,7	108,2	107,6	107,1	106,6	106,1	105,6
0,42	105,1	104,6	104,1	103,6	103,1	102,6	102,2	101,7	101,2	100,7
0,43	100,3	99,8	99,3	98,9	98,4	98,0	97,5	97,1	96,6	96,2
0,44	95,8	95,3	94,9	94,5	94,0	93,6	93,2	92,8	92,4	92,0
0,45	91,6	91,1	90,7	90,3	89,9	89,6	89,2	88,8	88,4	88,0
0,46	87,6	87,2	86,9	86,5	86,1	85,7	85,4	85,0	84,6	84,3
0,47	83,9	83,6	83,2	82,9	82,5	82,2	81,8	81,5	81,1	80,8
0,48	80,5	80,1	79,8	79,5	79,1	78,8	78,5	78,2	77,9	77,5
0,49	77,2	76,9	76,6	76,3	76,0	75,7	75,4	75,1	74,8	74,5
0,50	74,2	73,9	73,6	73,3	73,0	72,7	72,4	72,1	71,8	71,6
0,51	71,3	71,0	70,7	70,4	70,2	69,9	69,6	69,4	69,1	68,8

Продолжение табл. П.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,52	68,6	68,3	68,0	67,8	67,5	67,3	67,0	66,8	66,5	66,3
0,53	66,0	65,8	65,5	65,3	65,0	64,8	64,5	64,3	64,1	63,8
0,54	63,6	63,3	63,1	62,9	62,6	62,4	62,2	62,0	61,7	61,5
0,55	61,3	61,1	60,8	60,6	60,4	60,2	60,0	59,8	59,5	59,3
0,56	59,1	58,9	58,7	58,5	58,3	58,1	57,9	57,7	57,5	57,3
0,57	57,1	56,9	56,7	56,5	56,3	56,1	55,9	55,7	55,5	55,3
0,58	55,1	54,9	54,7	54,5	54,4	54,2	54,0	53,8	53,6	53,4
0,59	53,3	53,1	52,9	52,7	52,5	52,4	52,2	52,0	51,8	51,7
0,60	51,5	51,3	51,2	51,0	50,8	50,7	50,5	50,3	50,2	50,0
0,61	49,8	49,7	49,5	49,3	49,2	49,0	48,9	48,7	48,5	48,4
0,62	48,2	48,1	47,9	47,8	47,6	47,5	47,3	47,2	47,0	46,9
0,63	46,7	46,6	46,4	46,3	46,1	46,0	45,8	45,7	45,5	45,4
0,64	45,3	45,1	45,0	44,8	44,7	44,6	44,4	44,3	44,2	44,0
0,65	43,9	43,7	43,6	43,5	43,3	43,2	43,1	43,0	42,8	42,7
0,66	42,6	42,4	42,3	42,2	42,1	41,9	41,8	41,7	41,5	41,4
0,67	41,3	41,2	41,1	40,9	40,8	40,7	40,6	40,5	40,3	40,2
0,68	40,1	40,0	39,9	39,7	39,6	39,5	39,4	39,3	39,2	39,1
0,69	38,9	38,8	38,7	38,6	38,5	38,4	38,3	38,2	38,1	37,9
0,70	37,8	37,7	37,6	37,5	37,4	37,3	37,2	37,1	37,0	36,9
0,71	36,8	36,7	36,6	36,5	36,4	36,3	36,2	36,1	36,0	35,9
0,72	35,8	35,7	35,6	35,5	35,4	35,3	35,2	35,1	35,0	34,9
0,73	34,8	34,7	34,6	34,5	34,4	34,3	34,2	34,1	34,0	33,9
0,74	33,9	33,8	33,7	33,6	33,5	33,4	33,3	33,2	33,1	33,0
0,75	33,0	32,9	32,8	32,7	32,6	32,5	32,4	32,4	32,3	32,2
0,76	32,1	32,0	31,9	31,8	31,8	31,7	31,6	31,5	31,4	31,4
0,77	31,3	31,2	31,1	31,0	30,9	30,9	30,8	30,7	30,6	30,6
0,78	30,5	30,4	30,3	30,2	30,2	30,1	30,0	29,9	29,9	29,8
0,79	29,7	29,6	29,6	29,5	29,4	29,3	29,3	29,2	29,1	29,0
0,80	29,0	28,9	28,8	28,8	28,7	28,6	28,5	28,5	28,4	28,3
0,81	28,3	28,2	28,1	28,0	28,0	27,9	27,8	27,8	27,7	27,6
0,82	27,6	27,5	27,4	27,4	27,3	27,2	27,2	27,1	27,0	27,0
0,83	26,9	26,8	26,8	26,7	26,7	26,6	26,5	26,5	26,4	26,3
0,84	26,3	26,2	26,2	26,1	26,0	26,0	25,9	25,8	25,8	25,7
0,85	25,7	25,6	25,5	25,5	25,4	25,4	25,3	25,2	25,2	25,1
0,86	25,1	25,0	25,0	24,9	24,8	24,8	24,7	24,7	24,6	24,6
0,87	24,5	24,4	24,4	24,3	24,3	24,2	24,2	24,1	24,1	24,0
0,88	23,9	23,9	23,8	23,8	23,7	23,7	23,6	23,6	23,5	23,5
0,89	23,4	23,4	23,3	23,2	23,2	23,1	23,1	23,0	23,0	22,9
0,90	22,9	22,8	22,8	22,7	22,7	22,6	22,6	22,5	22,5	22,4
0,91	22,4	22,3	22,3	22,2	22,2	22,1	22,1	22,0	22,0	22,0
0,92	21,9	21,9	21,8	21,8	21,7	21,7	21,6	21,6	21,5	21,5
0,93	21,4	21,4	21,3	21,3	21,3	21,2	21,2	21,1	21,1	21,0
0,94	21,0	20,9	20,9	20,8	20,8	20,8	20,7	20,7	20,6	20,6
0,95	20,5	20,5	20,5	20,4	20,4	20,3	20,3	20,2	20,2	20,2
0,96	20,1	20,1	20,0	20,0	20,0	19,9	19,9	19,8	19,8	19,7
0,97	19,7	19,7	19,6	19,6	19,5	19,5	19,5	19,4	19,4	19,3
0,98	19,3	19,3	19,2	19,2	19,1	19,1	19,1	19,0	19,0	19,0

Продолжение табл. П.3



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,99	18,9	18,9	18,8	18,8	18,8	18,7	18,7	18,7	18,6	18,6
1,00	18,5	18,5	18,5	18,4	18,4	18,4	18,3	18,3	18,2	18,2
1,01	18,2	18,1	18,1	18,1	18,0	18,0	18,0	17,9	17,9	17,9
1,02	17,8	17,8	17,8	17,7	17,7	17,6	17,6	17,6	17,5	17,5
1,03	17,5	17,4	17,4	17,4	17,3	17,3	17,3	17,2	17,2	17,2
1,04	17,1	17,1	17,1	17,0	17,0	17,0	16,9	16,9	16,9	16,8
1,05	16,8	16,8	16,8	16,7	16,7	16,7	16,6	16,6	16,6	16,5
1,06	16,5	16,5	16,4	16,4	16,4	16,3	16,3	16,3	16,3	16,2
1,07	16,2	16,2	16,1	16,1	16,1	16,0	16,0	16,0	16,0	15,9
1,08	15,9	15,9	15,8	15,8	15,8	15,7	15,7	15,7	15,7	15,6
1,09	15,6	15,6	15,5	15,5	15,5	15,5	15,4	15,4	15,4	15,4
1,10	15,3	15,3	15,3	15,2	15,2	15,2	15,2	15,1	15,1	15,1
1,11	15,0	15,0	15,0	15,0	14,9	14,9	14,9	14,9	14,8	14,8
1,12	14,8	14,8	14,7	14,7	14,7	14,6	14,6	14,6	14,6	14,5
1,13	14,5	14,5	14,5	14,4	14,4	14,4	14,4	14,3	14,3	14,3
1,14	14,3	14,2	14,2	14,2	14,2	14,1	14,1	14,1	14,1	14,0
1,15	14,0	14,0	14,0	13,9	13,9	13,9	13,9	13,8	13,8	13,8
1,16	13,8	13,8	13,7	13,7	13,7	13,7	13,6	13,6	13,6	13,6
1,17	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,4	13,4	13,4	13,4	13,3
1,18	13,3	13,3	13,3	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,1	13,1
1,19	13,1	13,1	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	12,9	12,9	12,9
1,20	12,9	12,9	12,8	12,8	12,8	12,8	12,7	12,7	12,7	12,7
1,21	12,7	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,5	12,5	12,5	12,5
1,22	12,5	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,3	12,3	12,3	12,3
1,23	12,3	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,1	12,1	12,1	12,1
1,24	12,1	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	11,9	11,9	11,9	11,9
1,25	11,9	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,7	11,7	11,7
1,26	11,7	11,7	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,5	11,5	11,5
1,27	11,5	11,5	11,5	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,3
1,28	11,3	11,3	11,3	11,3	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
1,29	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,0	11,0	11,0	11,0
1,30	11,0	11,0	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,8	10,8
1,31	10,8	10,8	10,8	10,8	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7
1,32	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,5	10,5	10,5	10,5
1,33	10,5	10,5	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,3
1,34	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
1,35	10,2	10,2	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,0
1,36	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	9,9	9,9	9,9	9,9
1,37	9,9	9,9	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,7
1,38	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,6	9,6	9,6
1,39	9,6	9,6	9,6	9,6	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
1,40	9,5	9,4	9,4	9,4	9,4	9,4	9,4	9,4	9,4	9,3
1,41	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,2	9,2	9,2	9,2
1,42	9,2	9,2	9,2	9,2	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1
1,43	9,1	9,1	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
1,44	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,8	8,8
1,45	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,7	8,7	8,7	8,7

Продолжение табл. П.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----





Таблица П.4 – Минимальная толщина образцов для разных чисел твердости

Наименование шкалы	Число твердости по Роквеллу	Минимальная толщина образца, мм
A	70	0,7
A	80	0,5
A	90	0,4
B	25	2,0
B	30	1,9
B	40	1,7
B	50	1,5
B	60	1,3
B	70	1,2
B	80	1,0
B	90	0,8
B	100	0,7
C	20	1,5
C	30	1,3
C	40	1,2
C	50	1,0
C	60	0,8
C	67	0,7

Таблица П.5 – Числа микротвердости при испытании вдавливанием четырехгранной алмазной пирамиды при нагрузке 50 гс

Диагональ отпечатка, мкм	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	-	-	-	-	3708	2575	1892	1448	1144
10	927	766	644	549	473	412	362	321	286	257
20	232	210	192	175	161	148	137	127	118	110
30	103,0	96,5	90,5	85,1	80,2	75,7	71,5	67,7	64,2	60,9
40	57,9	55,1	52,6	50,1	47,9	45,8	43,8	42,0	40,2	38,6
50	37,1	35,6	34,3	33,0	31,8	30,6	29,6	28,5	27,6	26,6
60	25,8	24,9	24,1	23,4	22,6	21,9	21,3	20,7	20,0	19,5
70	18,9	18,4	17,9	17,4	16,9	16,5	16,0	15,6	15,2	14,9
80	14,5	14,1	13,8	13,5	13,1	12,8	12,5	12,2	12,0	11,7
90	11,4	11,2	11,0	10,7	10,5	10,3	10,1	9,9	9,7	9,5