

Лабораторная работа 2

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

МАТЕРИАЛОВ

2.1. Общие понятия о механических свойствах материалов

Для изготовления деталей машин используются различные материалы: стали, чугуны, цветные металлы и сплавы, дерево и пластмассы. Выбор материала определяется назначением детали, условиями ее работы и характером нагружения, так что детали одного и того же назначения в различных условиях могут изготавливаться из различных материалов. Также немаловажным фактором является стоимость изделия, причем не всегда более дешевые материалы являются предпочтительными. Например, если для изготовления зубчатой передачи взять два материала, у второго из которых допускаемое напряжение будет в два раза больше, чем у первого, а цена в два с половиной раза выше и провести сравнительную оценку стоимости изготовленных редукторов, то окажется, что стоимость редуктора из второго, то есть более дорогого материала, будет ниже. Это объясняется тем, что при увеличении допускаемого напряжения в два раза линейные размеры передачи и корпуса сократятся примерно на 40%, а объем и вес уменьшатся в 4 раза. Следовательно, несмотря на применение более дорогого материала, стоимость механизма окажется ниже.

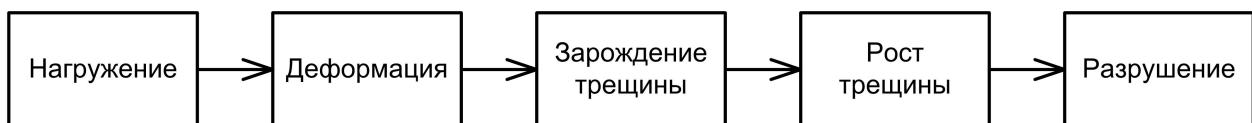


Рис. 2.1. Схема поведения материала под действием нагрузки.

Таким образом, грамотный выбор материала невозможен без оценки его *механических свойств* — способности материала сопротивляться нагрузкам в различных условиях. Схема поведения материала при приложении нагрузки показана на рисунке 2.1.

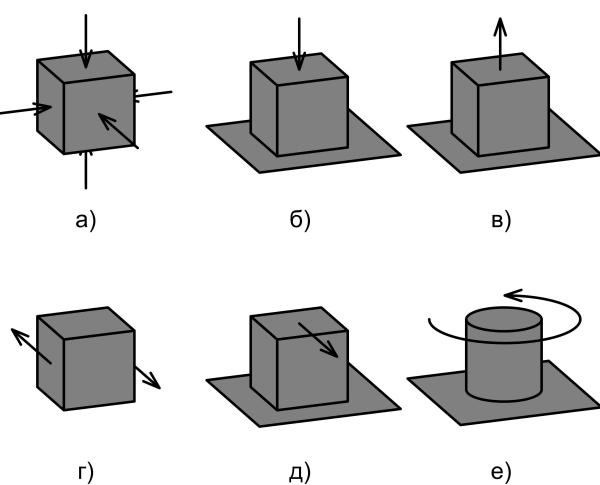


Рис. 2.2. Воздействие нагрузок на тело: а — всестороннее сжатие, б — одностороннее сжатие, в — растяжение, г — сдвиг, д — изгиб, е — кручение. Тело жестко закреплено на опорной плоскости.

материала говорят о разных его свойствах.

Поскольку свойства материала проявляются при нагружении, целесообразно начать их изучение с рассмотрения видов воздействия на материал. Отметим также, что в работе, в основном, изучаются свойства металлов. Для других материалов будут даны соответствующие пояснения.

Наиболее распространенные виды нагружения материалов приведены на рисунке 2.2. Чаще всего встречается не какой-то конкретный вид нагружения, а различные их комбинации. Возникающие нагрузки могут быть как *статическими* (не изменяющиеся во времени или изменяющиеся незначительно), так и *динамическими* — циклически изменяющимися во времени. Как будет показано далее, для различных режимов работы

Формально нагрузку можно описать с помощью понятия *напряжения*. Напряжением σ называют величину приложенной силы (нагрузку) F , отнесенную к площади поперечного сечения нагруженного тела S :

$$\sigma = \frac{F}{S}.$$

Таким образом, напряжение имеет размерность Н/м^2 , в системе СИ представляющую собой паскали (Па). Отметим, что нам будет удобно пользоваться мегапаскалями ($1\text{МПа} = 10^6\text{ Па}$).

Сила F представляет собой вектор. Рассмотрим случай, когда направление силы не перпендикулярно поверхности приложения (если разрезать цилиндр как показано на рисунке 2.3). В этом случае вектор силы раскладывается на две составляющие, одна из которых стремится растянуть стержень, другая же стремится сдвинуть поверхностный слой. Соответственно, необходимо говорить о двух значениях напряжений. Напряжение, вызванное силой $F \cdot \cos(\alpha)$, стремящейся растянуть образец называется *нормальным напряжением* и выражается следующим образом:

$$\sigma = \frac{F \cos(\alpha)}{S / \cos(\alpha)} = \frac{F}{S} \cdot \cos^2(\alpha).$$

Напряжение, вызванное силой $F \cdot \sin(\alpha)$ называется *сдвиговым* или *касательным*, обозначается как τ и вычисляется по выражению:

$$\tau = \frac{F \sin(\alpha)}{S / \cos(\alpha)} = \frac{F}{S} \cdot \sin(\alpha) \cos(\alpha).$$

Сама по себе величина нагрузки ничего не говорит о результате её действия. Надо знать, какое напряжение в материале вызовет эта нагрузка. В технике чаще всего заранее известна нагрузка, которую будет нести деталь из данного материала, и напряжение, которое для него может быть опасным. Задача конструктора — так выбрать размеры и форму детали, чтобы уровень напряжения не превысил допустимого.

Нагрузки вызывают соответствующие *деформации* — изменения формы и размеров образца. При этом изменения разных размеров взаимосвязаны. Например, при растяжении образца возникает как его удлинение, так и изменение площади поперечного сечения. Взаимосвязь между этими деформациями может быть определена с помощью коэффициента Пуассона:

$$\nu = -\frac{\Delta l / l_0}{\Delta S / S_0},$$

где l_0 — длина образца, Δl — изменение длины под действием нагрузки, S_0 — площадь поперечного сечения, ΔS — изменение площади поперечного сечения под действием нагрузки.

Нетрудно проверить, что для несжимаемого вещества при малых нагрузках коэффициент Пуассона равен $\nu = 0,5$. Для реальных материалов это отношение обычно является меньшим.

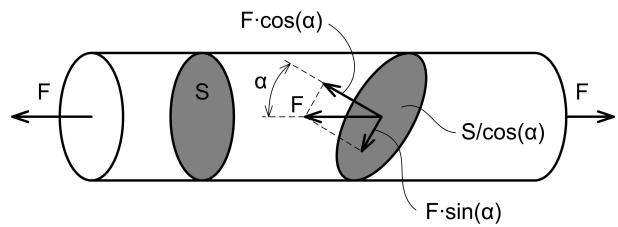


Рис. 2.3. Напряжения.

Если рассмотреть все возможные варианты деформации материалов, можно выделить две основные группы — сжатие (растяжение) и сдвиг. Например, при изгибе стержня верхние слои подвергаются растяжению, а нижние слои — сжатию. Деформация сдвига вызывается касательными напряжениями и часто сопутствует другим деформациям. Наиболее «чистая» деформация сдвига имеет место в случае кручения тонкостенной трубы.

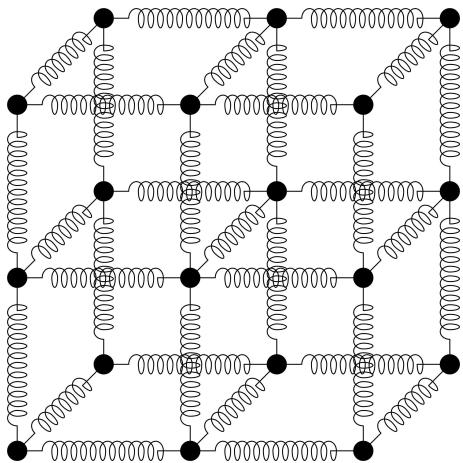


Рис. 2.4. Упругая деформация.

криSTALLической решетки материала связаны пружинками как показано на рисунке 2.4. При приложении нагрузки пружинки сжимаются и структура деформируется. Когда нагрузка снята, длина пружинок восстанавливается и структура возвращается к первоначальному размеру.

Механизм пластического деформирования принципиально отличается от упругого деформирования. В этом случае при приложении касательных напряжений одна часть кристалла перемещается по отношению к другой, причем если нагрузку снять, то перемещенная часть кристалла не возвратится на старое место, то есть деформация сохранится. Кроме того, пластическое деформирование поликристаллических материалов (которыми являются большинство материалов, используемых в технике) сопровождается дроблением блоков мозаики внутри зерен, а при значительных степенях деформации наблюдается также заметное изменение форм зерен и их расположения в пространстве, причем между зернами возникают пустоты (поры).

Рассмотрим механизм пластической деформации в наиболее совершенных структурах — так называемых «усах» (длинных и очень тонких кристаллов) или кристаллах бездислокационного кремния, применяемого в электронике. Обе структуры характеризуются тем, что в них отсутствуют *дислокации*¹ (несовершенства кристаллической решетки). На рисунке 2.5а показано исходное положение кристалла. После приложения нагрузки P , верхняя часть его начинает смещаться как единое целое. До тех пор, пока нагрузка не достигнет некоторого критического значения, деформация считается упругой, то есть кристалл восстановит свою форму после снятия нагрузки (рисунок 2.5б). В случае превышения максимальной нагрузки верхняя часть кристалла сдвигается на один период решетки, причем это смещение необратимо (рисунок 2.5в). Величина критической нагрузки P велика, на порядки больше, чем у несовершенных кристаллов.

Деформация может быть *упругой*, исчезающей после снятия нагрузки и *пластической* — остающейся после разгрузки. Это формальное определение понятий, но между упругой и пластической деформацией существует глубокое физическое различие.

При упругом деформировании под действием внешней силы изменяется расстояние между атомами в кристаллической решетке. Снятие нагрузки устраняет причину, вызвавшую изменение межатомного расстояния, атомы становятся на прежние места и деформация исчезает. Понять механизм упругой деформации можно проводя следующую аналогию: представим себе, что все атомы

¹ Для того, чтобы иметь представление о дислокациях, рекомендуется обратиться к [2]. Более полную информацию можно получить в [1].

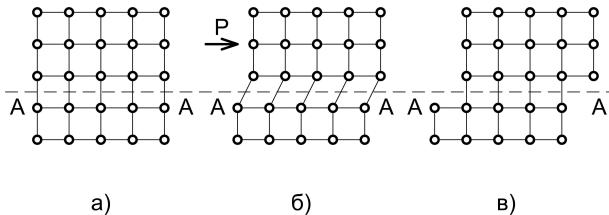


Рис. 2.5. Схема пластической деформации в бездислокационных кристаллах («усах»).

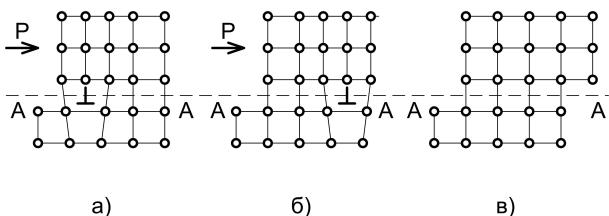


Рис. 2.6. Схема пластической деформации в обычных кристаллах при наличии дислокаций.

мо передвинуть большой и тяжелый ковер, расстеленный на полу. Если мы попытаемся сдвинуть его, потянув за край, то необходимо приложить большие усилия (как в бездислокационных структурах). Если же сделать с одного края складку и потом протолкнуть ее в другой конец, усилий придется затратить гораздо меньше (как с помощью дислокации).

Для оценки деформации необходимо ввести ее количественную характеристику. Обычно величину деформации описывают относительным удлинением ε :

$$\varepsilon = \frac{\delta l}{l},$$

где l — первоначальная длина образца, δl — абсолютное удлинение образца.

Свойства материала могут быть описаны так называемой диаграммой растяжения — графиком зависимости напряжения σ от величины относительной деформации ε . В зависимости от типа материала, этот график имеет различный вид. Примеры диаграмм растяжения представлены на рисунке 2.7.

На диаграмме растяжения (а) представлен хрупкий материал, а на диаграмме (б) — пластичный. Принципиальная разница между этими материалами в том, что для пластичного материала существует нагрузка, при которой материал «течет», то есть происходит резкое увеличение длины образца при неизменной нагрузке.

На диаграмме растяжения всегда можно выделить характерные участки. Например, прямой участок в левой части диаграммы (OA) — участок упругой деформации. Разгрузение материала всегда происходит параллельно этой прямой. То есть если мы нагружим материал не выше точки А, разгрузка всегда приведет к началу координат, то есть отсутствию остаточной деформации.

Участок кривой выше точки А — участок пластической деформации, так как разгрузка материала не приведет к началу координат и, соответственно, появится остаточная деформация.

Участок АА' называется площадкой текучести и характерен только для пластичных материалов. В этот момент материал «течет».

В несовершенных кристаллах с дислокациями пластическая деформация осуществляется другим образом. При приложении к исходному кристаллу нагрузки в первую очередь зарождается экстраплоскость (дислокация, отмеченная символом \perp), показанная на рисунке 2.6а. Далее проходит последовательный сдвиг слоев и перемещение дислокации к правому краю. После выхода дислокации на поверхность структура кристалла восстанавливается и сдвиг на период атомной решетки осуществлен (рисунок 2.6в).

Таким образом, особенность деформации реальных структур заключается в том, что кристалл сдвигается не как единое целое, а послойно. Можно провести следующую аналогию: представьте, что нам необходима

47

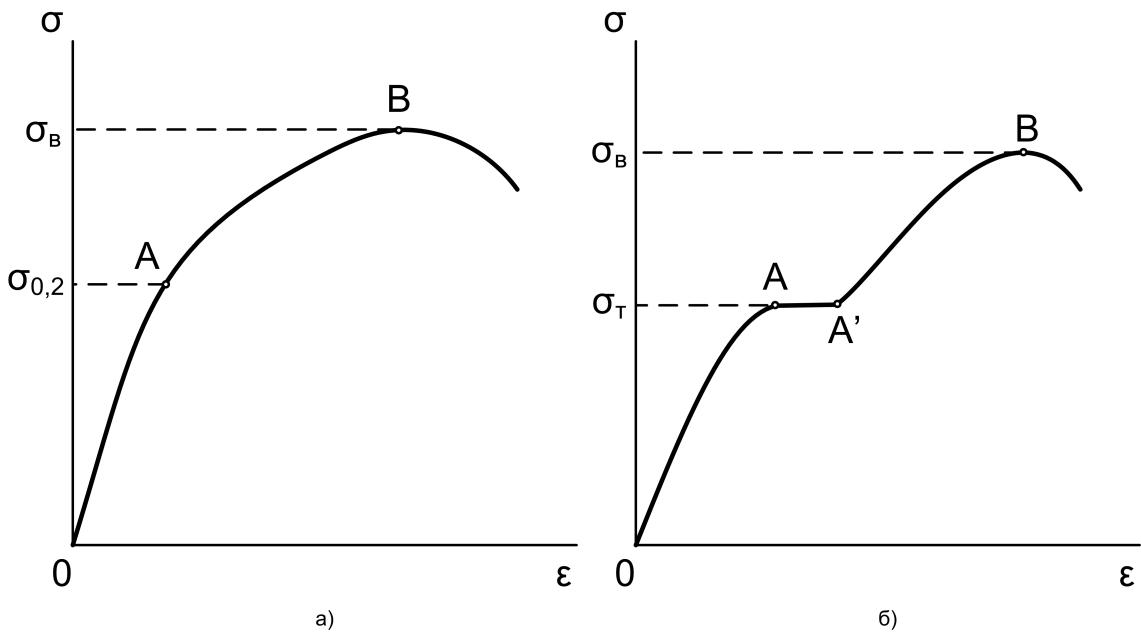


Рис. 2.7. Диаграммы растяжения для различных материалов.

Дальнейшее повышение нагрузки приводит к разрушению материала в точке В.

Все точки на диаграмме растяжения характеризуются так называемыми пределами. Так, положение точки А (то есть уровень окончания упругой деформации и начала пластической), называется пределом текучести. Причем, если на диаграмме растяжения присутствует площадка текучести, то мы говорим о физическом пределе текучести σ_t . Если же площадки текучести нет, то мы говорим об условном пределе текучести $\sigma_{0,2}$. Понятие условного предела текучести вводится искусственно для того, чтобы можно было разделять упругую и пластическую деформацию для хрупких материалов. Положение условного предела текучести определяется при величине относительной остаточной деформации равной $\varepsilon = 0,2\%$.

Положение точки В описывается пределом прочности или временным сопротивлением разрыву σ_b .

Итак, мы описали поведение материала от момента нагружения до полного разрушения. Выделим основные свойства материалов. Обычно сопротивление материала деформациям объединяют в общее понятие *прочность*, а сопротивление разрушению — *надежность*. Если разрушение происходит не за один цикл нагружения, а за большое количество повторяющихся циклов, то говорят о *долговечности*² материала. Высококачественный конструкционный материал должен быть одновременно прочным, надежным и долговечным.

Для измерения свойств материала применяют *разрушающие* и *неразрушающие* испытания. Рассмотрим каждый вид подробнее.

²Обратите внимание, что к этому же свойству материала относится стойкость к каким видам разрушения, как коррозия.

2.2. Разрушающие испытания материалов

2.2.1. Статическое растяжение

Для разрушающих испытаний на растяжение применяют стандартные образцы круглого или прямоугольного сечения (по ГОСТ 1497-73), чертеж одного из которых изображен на рисунке 2.8. Наиболее распространение в случае круглого сечения получили образцы с рабочим диаметром $d_0 = 10$ мм, длиной $l_0 = 10d_0$ или $l_0 = 5d_0$. Форма крепежной части образцов (головки) диктуется конструкцией захвата испытательной машины.

Перед испытаниями на готовых образцах проводят разметку, выделяя рабочую длину и измеряя точные значения исходных геометрических параметров l_0 и d_0 . После испытаний рабочую длину l_k и диаметр d_k измеряют вновь, что позволяет вычислить относительное удлинение δ и относительное сужение образца ψ , характеризующее способность материала к равномерной и сосредоточенной пластической деформации.

Места отбора проб для изготовления испытательных образцов, а также требования по термической обработке образцов оговариваются техническими условиями ГОСТа или отраслевого стандарта на аттестуемую продукцию. Этими же ТУ регламентируется уровень характеристик механических свойств, с которым необходимо сравнивать полученные результаты испытаний.

В схему устройства испытательной машины для растяжения входят следующие узлы: механизм для деформирования образца, механизм для измерения усилия, растягивающего образец, механизм подачи на образец и центрирования действующего усилия, станина, объединяющая механизмы в единое целое. По способу осуществления растяжения различают два типа машин: гидравлические и шпиндельные (механического действия).

Для определения деформаций растягиваемого образца применяют механические и оптико-механические тензометры, точность измерения которых достигает 0,01 мм. Для измерений деформаций в упругой области (то есть очень малых деформаций для металлических материалов) используют более точные приборы, способные к определению деформаций с точностью до 0,5 мкм.

Наряду с использованием точной и чувствительной измерительной аппаратуры для получения достоверной кривой растяжения важное значение имеет жесткость испытательной машины, определяемая упругой деформацией станины, захватов и других частей машины. С увеличением этой деформации машина становится «мягче» (податливее), а измеряемые величины с меньшей достоверностью характеризуют механические свойства испытуемого материала. Жесткость испытательной машины оценивают коэффициентом податливости $\theta = e_m/e_{обр}$, то есть отношением абсолютной упругой деформации машины и образца. Машины для испытаний на растяжение, особенно с автоматической записью кривых растяжения, конструируются с достаточно жестким коэффициентом податливости $\theta \leq 3 - 5$.

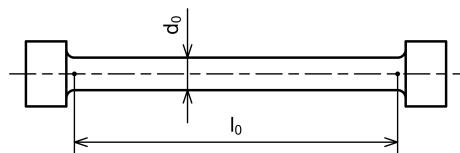


Рис. 2.8. Стандартный образец для испытания на растяжение.

2.3. Неразрушающие испытания материалов

Весьма часто для определения прочности пользуются простым, не разрушающим изделие (образец) упрощенным методом — измерением твердости. Под *твердостью* материала понимается сопротивление проникновению в него постороннего тела (*индентора*). То есть, по сути дела, твердость тоже характеризует сопротивление деформации (прочность).

Существуют статические и динамические методы измерения твердости. Под статическим подразумевается такой метод, при котором индентор медленно и непрерывно вдавливается в испытуемый образец с определенным усилием. К таким методам относятся методы Бринелля, Виккерса и Роквелла. Динамические методы основаны на величине отскока испытательного инструмента от поверхности испытуемого образца. К динамическим методам относят метод Шора.

Наибольшее распространение получили статические методы измерения твердости, поэтому рассмотрим их подробнее.

2.3.1. Метод определения твердости по Бринеллю

Этот способ определения твердости заключается во вдавливании стального шарика диаметром D в поверхность испытуемого образца под действием нагрузки P .

Число твердости по Бриннелю определяется как отношение нагрузки, приложенной к шарику, к площади сферического отпечатка:

$$HB = \frac{P}{F}$$

Площадь поверхности отпечатка определяется как площадь шарового сегмента:

$$F = \pi D h = \frac{\pi D^2}{2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2} \right).$$

Тогда формула для определения твердости имеет вид:

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

Из этой формулы видно, что при определении НВ можно производить измерение глубины отпечатка h или его диаметра d . Чаще в практике измерений используют измерением диаметра d , что производится с помощью специального микроскопа.

При проведении испытания по методу Бриннеля большое значение имеют: время выдержки шарика под нагрузкой, чистота поверхности образца, толщина испытуемого образца, расстояние отпечатка от края образца и от соседних отпечатков. Поэтому при определении твердости по Бриннелю требуется строгое выполнение следующих требований:

1. Диаметр шарика $D=10$ мм.
2. Нагрузка на шарик $P = 1000$ кГс.
3. Плавное возрастание нагрузки.
4. Время выдержки под нагрузкой — 10 секунд.
5. Минимальная толщина испытуемого образца должна быть не менее десятикратной глубины отпечатка.

6. Расстояние от края отпечатка до края образца или до края соседнего отпечатка должно быть не менее $(2\text{--}3)d$. Это требование следует из того, что свободный край образца будет облегчать деформацию, а близко расположенные соседние отпечатки оказывают упрочняющее влияние в результате наклена материала вблизи отпечатков.

7. Диаметр отпечатка должен измеряться с помощью специальных микроскопов в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Этим уменьшается влияние возможной эллипсоидальности шарика и анизотропии механических свойств материала, полученной, например, при холодной прокатке.

Имеется стандарт на обозначение числа твердости по Бриннелю. Например, НВ 10/1000/10–123 означает число твердости по Бриннелю 123 при испытании шариком $D=10$ мм под нагрузкой 1000 кГс, с выдержкой под нагрузкой 10 секунд.

2.3.2. Метод определения твердости по Виккерсу

В отличие от метода определения твердости по Бриннелю, при измерении твердости по Виккерсу в испытуемый образец вдавливается наконечник в форме правильной четырехгранной пирамиды под действием нагрузки P . Число твердости определяется путем деления нагрузки P на площадь F боковой поверхности полученного пирамидального отпечатка:

$$HV = \frac{P}{F}.$$

Если обозначить через d диагональ отпечатка после снятия нагрузки, то:

$$F = \frac{d^2}{2 \sin(\frac{\alpha}{2})}.$$

Угол при вершине между противоположными гранями пирамиды установлен постоянным и, согласно ГОСТ, $\alpha = 136^\circ$. Тогда формула для расчета твердости по Виккерсу принимает вид:

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2}.$$

Число твердости HV, по сравнению с HB, имеет существенные преимущества, выражаяющиеся в следующем:

1. Имеется практически полная независимость числа твердости HV от нагрузки, а, следовательно, и размеров отпечатка. Это позволяет применять любые нагрузки, удобные для опыта.

2. Применение алмазной пирамиды дает возможность определять твердости как мягких, так и исключительно твердых материалов.

3. Имеется возможность наносить очень малые отпечатки, которые можно обнаружить только под микроскопом при больших увеличениях. Это позволяет определить твердость в очень малых объемах (структурных составляющих) или тонких слоях (например, после поверхностной закалки).

При определении твердости по Виккерсу установлены следующие общие требования:

1. Несмотря на независимость твердости HV от нагрузки рекомендуется применять следующие нагрузки на индентор: 5, 10, 20, 30, 50, 100 кГс. Допустимо применение нагрузки и менее 5 кГс. Так, при определении микротвердости, применяются нагрузки 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 Гс. Твердость, определенная при таких малых нагрузках обозначается H с указанием в индексе величины нагрузки в граммах, например, $H_{20} - 627$ и

называется микротвердостью. С целью увеличения точности эксперимента, необходимо стремиться к применению по возможности больших по величине нагрузок.

2. Минимальная толщина испытуемого образца или слоя должна быть больше диагонали отпечатка в 2 раза. Расстояние между краями соседних отпечатков должно быть не менее $2d$.

3. Поверхность испытуемого образца должна иметь класс чистоты не ниже 10 и быть зеркально блестящей.

4. Продолжительность выдержки под нагрузкой должна составлять для черных металлов 10–15 секунд, для цветных металлов — 30 секунд.

5. Измеряются две диагонали отпечатка, причем разность размеров диагоналей не должна превышать 2% (для анизотропных материалов в технических условиях на поставку должны быть указаны допустимые пределы разброса на разность длин диагоналей отпечатка).

Имеется стандарт на обозначение числа твердости по Виккерсу. Например, HV 10/15–627 означает число твердости по Виккерсу 627, полученное под нагрузкой 10 кГс, приложенной в течение 15 секунд.

2.3.3. Метод определения твердости по Роквеллу

В отличие от разобранных выше методов определения твердости НВ и HV, согласно которым твердость характеризовалась удельным средним давлением (напряжением) при внедрении индентора в испытуемый материал, твердость по Роквеллу характеризуется глубиной вдавливания наконечника под определенной нагрузкой.

Точность измерения глубины отпечатка обычно оказывается меньшей, чем измерение диаметра (или диагонали). Это объясняется, главным образом, меньшей величиной глубины, наличием наплыва по краям отпечатка, сложностью измерения глубины посредством щупа, особенно при остром окончании индентора и малых размерах отпечатка. Эта сложность была преодолена путем непосредственного измерения глубины внедрения самого индентора, применяя предварительные нагрузжения.

Несмотря на простоту определения твердости по Роквеллу, достаточно трудно представить себе что непосредственно характеризует полученная из опыта величина твердости. Поэтому разберем следующий пример. Пусть индентор определенной формы под действием нагрузки P внедрился в испытуемый материал на величину h . Условимся, что если индентор внедрился на глубину 0,2 мм, то твердость такого материала условно будем считать равной нулю. Если же под действием той же нагрузки P индентор не внедрился в материал (пластическая деформация равна нулю), то твердость такого материала будем считать равной 100 единицам Роквелла. Применение такой «перевернутой» шкалы потребовалось для того, чтобы с увеличением твердости материала увеличивалось и число твердости HR (глубина же внедрения с увеличением твердости уменьшается). Поэтому твердость материала будет характеризоваться величиной $(h_0 - h)$ в миллиметрах или числом делений по шкале:

$$HR = (h_0 - h) \frac{100}{h_0}.$$

Практически оказывается невозможным осуществить измерение глубины внедрения, начиная с поверхности образца, так как будут возникать большие инструментальные ошибки, связанные с невозможностью точного определения момента касания индентора поверхности и в связи с этим некоторым неконтролируемым смятием материала в зоне контакта, особенно если имеется шероховатость поверхности. Поэтому дается предварительная нагрузка P_1 на индентор, принятая равной 10 кГ и измерение

величины $(h_0 - h)$ начинается после приложения этой предварительной нагрузки. Показания индикатора при приложении нагрузки P_1 условно принимают за нулевой отсчет. Затем дается нагрузка P_2 . Величина $(h_0 - h)$ измеряется, следовательно, от действия нагрузки $P = P_2 - P_1$.

При определении твердости по Роквеллу используются инденторы двух видов: стальной шарик и алмазный конус. Для материалов малой твердости ($HB < 240$) применяется стальной шарик диаметром 1/16 дюйма (1,588 мм). При этом используются нагрузки: $P_1 = 10$ кГ и $P_2 = 100$ кГ, то есть $P = P_2 - P_1 = 100 - 10 = 90$ кГ. Так как при такой нагрузке для большого числа мягких материалов внедрение шарика оказывается больше 0,2 мм, то величина внедрения шарика, подсчитываемая как разность $(h_0 - h)$ не может уже характеризовать твердость материала, так как при определении твердости число твердости окажется отрицательным, что лишено физического смысла. Поэтому при определении твердости по Роквеллу при внедрении шарика условились шкалу смешать на 30 единиц и число твердости определять по формуле:

$$HRB = (h_0 - h) \frac{100}{h_0} + 30.$$

Если в результате измерения получим, например, твердость, равную 52 единицам, то записывают: HRB 52. Такая запись числа твердости указывает, что измерение твердости производилось по Роквеллу по шкале В.

Для материалов с твердостью по Роквеллу $HRB > 100$ единиц (или по Бриннелю $HB > 240$) в качестве индентора применяется алмазный конус с углом при вершине $\alpha = 120^\circ$. Вершина конуса закругляется радиусом сферы $\rho = 0,2$ мм. Здесь применяются нагрузки $P_1 = 10$ кГ, $P_2 = 150$ кГ. Следовательно, $P = P_2 - P_1 = 150 - 10 = 140$ кГ. Смещение шкалы не производится и твердость определяется по исходной формуле. При этом говорят, что определено число твердости по Роквеллу по шкале С. Если в результате измерения получим твердость равную, например, 45 единицам, то записываем так: HRC 45.

При твердости выше HRC 67 (или HV 900) и малой толщине испытуемого материала (меньше 0,7 мм) необходимо использовать шкалу А. При этом конечная нагрузка уменьшается до $P_2 = 60$ кГ. Тогда $P = P_2 - P_1 = 60 - 10 = 50$ кГ. Обозначение твердости: HRA.

2.3.4. Взаимосвязь значений твердости

Поскольку по своей физической сущности числа твердости по Бриннелю, Виккерсу и Роквеллу описывают одно и то же свойство материала, эти величины связаны между собой. Существуют таблицы для перевода чисел твердости, пример одной из таких таблиц дан ниже.

Таблица 2.1: Таблица перевода значений твердости

Диаметр отпечатка <i>d</i> , мм	Твердость по Бриннелю HB			Твердость по Роквеллу HR			Твердость по Виккерсу HV	Твердость по Шору HSh		
	Нагрузка <i>P</i> , кг			Шкалы						
	$30D^2$	$10D^2$	$2,5D^2$	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>				
2,20	780	—	—	—	—	—	—	—		
2,25	745	—	—	—	—	70,0	—	—		
2,30	712	—	—	—	—	68,0	—	98		
2,35	682	—	—	—	—	66,0	—	94		
2,40	653	—	—	83,0	—	63,0	—	91		

2,45	627	—	—	82,5	—	61,5	816	87
2,50	601	—	—	81,0	—	59,0	756	84
2,55	578	—	—	80,0	—	57,5	699	81
2,60	555	—	—	79,0	—	56,0	653	78
2,65	534	—	—	78,5	—	54,5	618	76
2,70	514	—	—	77,5	—	52,5	586	73
2,75	495	—	—	76,0	—	50,5	556	71
2,80	477	—	—	76,0	—	49,5	531	68
2,85	461	—	—	75,0	—	48,0	511	66
2,90	444	—	—	74,0	—	47,0	484	64
2,95	429	—	—	73,0	—	45,5	463	62
3,00	415	—	34,6	73,0	—	44,0	442	61
3,05	401	—	33,4	72,0	—	42,5	423	59
3,10	388	129	32,3	71,0	—	41,0	406	57
3,15	375	125	31,1	71,0	—	40,0	392	56
3,20	363	121	30,3	70,0	—	39,0	377	54
3,25	352	117	29,3	69,0	—	38,0	364	53
3,30	341	114	28,4	69,0	—	37,0	351	51
3,35	331	110	27,6	68,0	—	36,0	340	50
3,40	321	107	26,7	68,0	—	35,0	328	49
3,45	311	104	25,9	67,0	—	34,0	317	47
3,50	302	101	25,2	67,0	—	33,0	307	46
3,55	293	97,7	24,5	66,0	—	31,5	298	45
3,60	285	95,0	23,7	66,0	—	30,0	288	44
3,65	277	92,3	23,1	65,5	—	29,0	280	43
3,70	269	89,7	22,4	65,0	—	28,0	271	42
3,75	262	87,2	21,8	64,0	—	27,0	264	41
3,80	255	84,9	21,2	64,0	—	26,0	259	40
3,85	248	82,6	20,7	63,0	—	25,0	249	39
3,90	241	80,4	20,1	63,0	100,0	24,0	242	38
3,95	235	78,3	19,6	62,0	99,0	23,0	235	37
4,00	229	76,3	19,1	62,0	98,0	22,0	229	36
4,05	223	74,3	18,6	61,5	97,5	21,5	223	35
4,10	217	72,4	18,1	61,0	97,0	20,0	217	34
4,15	212	70,6	17,6	60,5	95,5	19,0	212	34
4,20	207	68,8	17,2	60,0	95,0	18,0	206	33
4,25	201	67,1	16,8	59,0	93,0	—	200	32
4,30	197	65,5	16,4	58,0	93,0	—	196	31
4,35	192	63,9	16,0	58,0	91,5	—	191	30
4,40	187	62,4	15,6	57,0	91,0	—	186	30
4,45	183	60,9	15,2	56,0	89,5	—	182	29
4,50	179	59,5	14,9	56,0	88,0	—	179	29
4,55	174	58,1	14,5	55,0	87,0	—	173	28
4,60	170	56,8	14,2	55,0	86,0	—	169	28
4,65	167	55,5	13,9	54,0	85,0	—	166	27
4,70	163	54,3	13,6	53,0	84,0	—	162	27
4,75	159	53,0	13,3	53,0	83,0	—	158	26
4,80	156	51,9	13,0	52,0	82,0	—	155	26

4,85	152	50,7	12,7	52,0	81,0	—	152	25
4,90	149	49,6	12,4	51,0	80,0	—	149	24
4,95	146	48,6	12,2	50,0	78,0	—	146	24
5,00	143	47,5	11,9	50,0	77,0	—	143	24
5,05	140	46,5	11,6	—	76,5	—	—	23
5,10	137	45,5	11,4	—	75,0	—	—	23
5,15	134	44,6	11,2	—	74,0	—	—	23
5,20	131	43,7	10,9	—	72,5	—	—	22
5,25	128	42,8	10,7	—	71,0	—	—	22
5,30	126	41,9	10,5	—	70,0	—	—	22
5,35	123	41,0	10,3	—	69,0	—	—	21
5,40	121	40,2	10,1	—	68,0	—	—	21
5,45	118	39,4	9,86	—	67,0	—	—	21
5,50	116	38,6	9,66	—	65,0	—	—	20
5,55	114	37,9	9,46	—	64,0	—	—	20
5,60	111	37,1	9,27	—	63,0	—	—	20
5,65	109	36,4	9,10	—	61,0	—	—	20
5,70	107	35,7	8,93	—	59,0	—	—	19
5,75	105	35,0	8,76	—	58,5	—	—	19

2.4. Протокол испытаний

1. Подготовка образца.

Материал образца: Сталь Ст. 3.

Поверхность образца очищают от посторонних веществ.

2. Испытание на твердость по методу Бриннеля.

Устанавливаем образец на испытательную установку и проводим измерения в трех разных местах.

$$d_1 = 3,4 \text{ мм};$$

$$d_2 = 3,6 \text{ мм};$$

$$d_3 = 3,5 \text{ мм}.$$

Вычисляем среднее значение:

$$d_{cp} = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3} = \frac{3,4 + 3,6 + 3,5}{3} = 3,5 \text{ мм}.$$

По среднему значению из таблицы 2.1 выбираем опытное значение твердости по Бриннелю:

$$HB = 101.$$

По формуле (2.3.1) определяем стандартное значение твердости по Бриннелю:

$$HB_{ct} = 100,7.$$

Определяем относительную погрешность измерений:

$$\varepsilon = \frac{|HB - HB_{ct}|}{HB_{ct}} \cdot 100\% = \frac{|101 - 100,7|}{100,7} \cdot 100\% = 0,3\%$$

3. Испытание на твердость по методу Роквелла.

Для измерения твердости образца выбираем шкалу C. Устанавливаем образец на испытательную установку и проводим измерения в трех разных местах.

$$HRC_1 = 34;$$

$$HRC_2 = 35;$$

$$HRC_3 = 35.$$

Вычисляем среднее значение:

$$HRC_{cp} = \frac{HRC_1 + HRC_2 + HRC_3}{3} = \frac{34 + 35 + 35}{3} = 34,67.$$

4. Испытание на твердость по методу Виккерса.

Для определения твердости по методу Виккерса воспользуемся значением твердости по шкале Бриннеля и переводной таблицей 2.1:

$$HV_{cp} = 307.$$

5. Подготовка образцов для испытаний на растяжение.

Материал образца 1: сталь ст. 40.

Материал образца 2: бронза БрАЖ 9–4.

Для испытания изготавливаем образцы стандартной формы.

6. Определяем диаметр образцов.

Проводим измерение диаметра по краям и в центре рабочей длины:

Для образца 1:

$$d_1 = 5,0 \text{ мм};$$

$$d_2 = 5,0 \text{ мм};$$

$$d_3 = 5,0 \text{ мм}.$$

Для образца 2:

$$d_1 = 5,0 \text{ мм};$$

$$d_2 = 5,0 \text{ мм};$$

$$d_3 = 5,0 \text{ мм}.$$

Вычисляем среднее значение:

Для образца 1:

$$d_0 = \frac{d_1+d_2+d_3}{3} = \frac{5,0+5,0+5,0}{3} = 5,0 \text{ мм}.$$

Для образца 2:

$$d_0 = \frac{d_1+d_2+d_3}{3} = \frac{5,0+5,0+5,0}{3} = 5,0 \text{ мм}.$$

Вычислим площадь поперечного сечения образцов:

Для образца 1:

$$F_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 5,0^2}{4} = 19,6 \text{ мм}^2.$$

Для образца 2:

$$F_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 5,0^2}{4} = 19,6 \text{ мм}^2.$$

7. Определяем расчетную длину образцов.

Вычисляем начальную расчетную длину:

Для образца 1:

$$l_0 = 5,67\sqrt{F_0} = 5,67\sqrt{19,6} = 25,1 \text{ мм}.$$

Для образца 2:

$$l_0 = 5,67\sqrt{F_0} = 5,67\sqrt{19,6} = 25,1 \text{ мм}.$$

Округляем вычисленную величину до ближайшего большего значения, кратного пяти:

Для образца 1:

$$l_0 \approx 30 \text{ мм.}$$

Для образца 2:

$$l_0 \approx 30 \text{ мм.}$$

8. Проведение испытания.

Последовательно устанавливаем образцы в разрывную машину и производим разрыв с записью диаграмм растяжения.

9. Определение диаметра образца после разрыва.

Восстанавливаем образцы и измеряем диаметр в самом узком месте разрыва («шейке»).

Для образца 1:

$$d_k = 4,9 \text{ мм.}$$

Для образца 2:

$$d_k = 4,3 \text{ мм.}$$

Считая сечение плоскости разрыва кругом, определяем площадь поперечного сечения:

Для образца 1:

$$F_k = \frac{\pi d_k^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 4,9^2}{4} = 18,85 \text{ мм}^2.$$

Для образца 2:

$$F_k = \frac{\pi d_k^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 4,3^2}{4} = 14,52 \text{ мм}^2.$$

10. Определение конечной расчетной длины.

Для образца 1:

$$l_k = 34 \text{ мм.}$$

Для образца 2:

$$l_k = 36 \text{ мм.}$$

11. Определение максимальной нагрузки.

Максимальная нагрузка определяется из результатов, определяемых разрывной машиной.

Для образца 1:

$$P_{max} = 12 \text{ кН.}$$

Для образца 2:

$$P_{max} = 5 \text{ кН.}$$

12. Определение нагрузки при пределе текучести.

Поскольку на диаграммах растяжения отсутствуют площадки текучести, определяем условный предел текучести.

Вводим систему координат. Ось удлинения определяем как самую нижнюю линию миллиметровой бумаги. Находим участок упругой деформации (прямой участок в левой части диаграммы растяжения) и продлеваем его до пересечения с осью удлинения. Пересечение этих линий дает нам начало координат. Из него восстанавливаем ось нагрузок.

Масштаб по оси удлинений определяется параметрами разрывной машины. Для образца 1 он составляет 50:1, для образца 2 — 60:1. Масштаб по оси нагрузок определяется с помощью максимального значения нагрузки. Графики подготовлены для расчетов.

Определяем величину абсолютной деформации образцов при величине относительной деформации $\varepsilon = 0,2\%$.

Для образца 1:

$$\Delta l = l_0 \varepsilon = 30 \cdot 0,002 = 0,06 \text{ мм.}$$

Для образца 2:

$$\Delta l = l_0 \varepsilon = 30 \cdot 0,002 = 0,06 \text{ мм.}$$

Откладываем эти величины на диаграммах растяжения от начала координат вправо (с учетом масштаба). Из полученной точки проводим прямую, параллельную участку упругой деформации до пересечения с графиком. Точка пересечения определяет значение нагрузки при условном пределе текучести.

Для образца 1:

$$P_{0,2} = 7,58 \text{ кН.}$$

Для образца 1:

$$P_{0,2} = 2,60 \text{ кН.}$$

13. Определение предела прочности.

Для образца 1:

$$\sigma_b = \frac{P_{max}}{F_0} = \frac{12000}{19,6} = 612,2 \text{ Н/мм}^2.$$

Для образца 2:

$$\sigma_b = \frac{P_{max}}{F_0} = \frac{5000}{19,6} = 255,1 \text{ Н/мм}^2.$$

14. Определение предела текучести.

Для образца 1:

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0} = \frac{7580}{19,6} = 366,6 \text{ Н/мм}^2$$

Для образца 1:

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0} = \frac{2600}{19,6} = 132,6 \text{ Н/мм}^2$$

15. Определение относительного удлинения.

Для образца 1:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\% = \frac{34 - 30}{30} \cdot 100\% = 13\%.$$

Для образца 2:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\% = \frac{36 - 30}{30} \cdot 100\% = 20\%.$$

16. Определение относительного сужения.

Для образца 1:

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\% = \frac{19,6 - 18,8}{19,6} \cdot 100\% = 4\%.$$

Для образца 2:

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\% = \frac{19,6 - 14,5}{19,6} \cdot 100\% = 26\%.$$

17. Результаты испытаний.

Материал	Число твердости HV		Относительная погрешность	HRC	HV
	опытное	стандартное			
Ст. 3	101	100,7	0,3%	34,67	307

Рис. 2.9. Результаты испытаний на твердость.

Номер образца	Начальный диаметр, мм	Начальная площадь поперечного сечения, мм^2	Начальная расчетная длина, мм	Диаметр после разрыва, мм	Площадь поперечного сечения после разрыва, мм^2	Конечная расчетная длина, мм	Максимальная нагрузка, кН	Нагрузка при пределе текучести, кН	Предел прочности, $\text{Н}/\text{мм}^2$	Предел текучести, $\text{Н}/\text{мм}^2$	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
1	5,0	19,6	30	4,9	18,8	34	12	7,58	612	386	13	4
2	5,0	19,6	30	4,3	14,5	36	5	2,60	255	132	20	26

Рис. 2.10. Результаты испытаний на статическое растяжение.

18. Диаграммы растяжения.

2.5. Контрольные вопросы

Для успешного выполнения лабораторной работы рекомендуется подготовить ответы к следующим вопросам:

Как ведет себя материал под действием нагрузки? Какие существуют виды воздействия нагрузок на тела (по характеру приложения)? Какие существуют виды воздействия нагрузок на тела (по изменению во времени)? Что такое напряжение (как рассчитывается, в каких единицах измеряется)? Что такое деформация? Какие существуют виды деформации материалов? Что такое относительное удлинение? Где на диаграмме растяжения расположен участок упругой деформации (изобразить)? Где на диаграмме растяжения расположен участок пластической деформации (изобразить)? Где на диаграмме растяжения расположена точка разрушения материала (изобразить)? Что такое прочность? Что такое долговечность? Что такая надежность? Какие существуют виды испытаний материалов? Изобразите форму стандартного образца для испытаний на растяжение (с указанием соотношения размеров). Какие существуют методы определения твердости? Какой индентор используется в методе определения твердости по Бринеллю? Какой индентор используется в методе определения твердости по Виккерсу? Какой индентор используется в методе определения твердости по Роквеллу? Чем принципиально отличается метод Роквелла от других методов определения твердости? Что такое микротвердость?

В качестве дополнительного материала рекомендуется подготовиться к развернутому ответу по следующим темам:

- Виды напряжений, возникающие в материалах.
- Механизмы деформирования материалов.
- Определение точек на диаграмме растяжения.
- Методика проведения эксперимента по измерению твердости.