

ЛАБОРАТОНАЯ РАБОТА № 4

Изучение механической прочности

1.7.1. Общие сведения

Теоретическая прочность. Механические свойства определяются в первую очередь силами связи, действующими между атомами или молекулами, составляющими твердое тело.

Теоретическую прочность определяют как прочность твердых тел с идеальной структурой, не нарушенной никакими несовершенствами, дефектами и повреждениями. Теоретическая прочность как характеристика структуры твердого тела вычисляется для простых видов напряженного состояния, например для всестороннего или одностороннего растяжения или сдвига.

Высокопрочными являются не только материалы с идеальной структурой, но и реальные материалы с микронеоднородной структурой, если отсутствуют микротрещины и другие дефекты.

Теоретическая прочность представляет собой то критическое напряжение, которое надо приложить к идеальному бездефектному материалу при достаточно низких температурах, чтобы получить необратимое разрушение материала. При всестороннем растяжении диссоциация на отдельные атомы представляет собой воображаемое геометрически правильное облако расширяющегося «газа», состоящего из атомов твердого тела. При одноосном растяжении разрушение происходит по атомным плоскостям, перпендикулярным направлению растяжения. При этих условиях потенциальная энергия $U(r)$ каждого атома иона твердого тела по мере растяжения, начиная от положения равновесия (r_0 – равновесное расстояние между атомами до приложения сил), непрерывно увеличивается, а сила взаимодействия между атомами $f(r) = \partial U / \partial r$ или ее абсолютное значение проходит через максимум (рис. 1.24) При квазистатическом (медленном) растяжении до точки М напряжение растяжения σ , приложенное к образцу, уравнивается в каждый момент времени внутренними силами взаимодействия N_1 атомов в единице площади сечения, перпендикулярного направлению растяжения. Максимальной силе взаимодействия f_m соответствует теоретическая прочность

$$\sigma_m = N_1 f_m. \quad (1.29)$$

Наиболее простой метод очень приближенной оценки теоретической прочности – это определение прочности f связи двух изолированных атомов. Если принять N_1 как число химических связей, приходящихся на 1 см^2 твердого тела, теоретическая прочность будет пропорциональна σ_m .

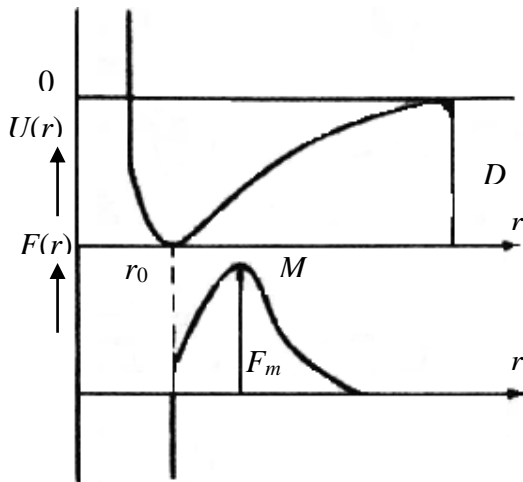


Рис. 1.24. Потенциальная энергия атома в твердом теле $U(r)$ и абсолютное значение квазиупругой силы $F(r)$ в зависимости от межатомного расстояния r в направлении растяжения:

D – энергия диссоциации

При строгом расчете теоретической прочности необходимо перейти от потенциала парного взаимодействия $\varphi(r)$ к энергии $U(r)$ атомов в твердом теле. В тех случаях, когда энергия межатомного взаимодействия может считаться аддитивной величиной, этот переход совершается путем простого суммирования по всем атомам. Так рассчитывается теоретическая прочность ковалентных, ионных и молекулярных кристаллов.

Строгие расчеты теоретической прочности требуют знания структуры твердого тела и

потенциала межатомного взаимодействия. Переход от парного взаимодействия $\varphi(r)$ данного атома с любым другим к потенциальной энергии $U(r)$ взаимодействия данного атома с совокупностью всех других атомов твердого тела требует сложных математических вычислений. Получающийся в итоге результат дает для $U(r)$ ту же функциональную зависимость от r , что и для парного потенциала $\varphi(r)$.

Последнее обстоятельство обеспечивает возможность расчета теоретической прочности.

Для расчета теоретической прочности ионных кристаллов можно применить выражение

$$\sigma_r = \frac{1,75z_1z_2l^2s}{6\gamma r_0^3(r_a + r_b)} B_n = \frac{1,75l^2K}{6}, \quad (1.30)$$

где z_1 и z_2 – эффективные заряды ионов, Кл; r_0 – расстояние между соседними ионами до начала всестороннего растяжения кристалла в недеформированном состоянии, нм; s – число ионов в химической формуле кристалла, шт.; $r_a + r_b$ – расстояние между ионами a и b по Гюбшмидту для гранцентрированной структуры, нм; γ – численный коэффициент, связывающий между собой объем $v_0 = \gamma r_0^3$, приходящийся на один узел решетки, и расстояние r при всестороннем растяжении: $r > r_0$; B_n – постоянная, вычисляемая по формуле

$$B_n = \frac{n-1}{n+3} \left(\frac{4}{n+3} \right)^{4/n-1}, \quad (1.31)$$

где n – показатель сил отталкивания для ионных кристаллов, $n = 9$.

Теоретическая прочность ионных кристаллов уменьшается по мере увеличения атомного номера щелочного и щелочноземельного элемента периодической системы элементов. Это отчасти объясняется тем, что с

увеличением радиуса иона возрастает кратчайшее расстояние в ионном кристалле, а следовательно, уменьшается число связей, приходящихся на единицу площади поперечного сечения кристалла.

Таким образом, на основании расчета теоретической прочности, выявляется правило: по мере уменьшения атомного номера элементов теоретическая прочность твердых тел возрастает.

Е. Орован установил, что теоретическая прочность твердых тел может быть установлена по значению модуля упругости E из соотношения $\sigma_m \approx 0,1E$

Реальная (техническая) прочность. Прочность реальных кристаллов и твердых тел, используемых в технике, называют реальной или технической прочностью σ_p . Реальный процесс разрушения отличается от теоретического. Твердое тело при разрушении распадается не на молекулы или атомы (атомные плоскости), а на малое или большое число макрочастей.

Реальные материалы содержат или готовые дефекты, или появляющиеся под действием тепловых флуктуаций и напряжений. Дефекты являются концентраторами напряжений и вследствие этого преимущественными местами разрыва связей. Напряжения на дефектах могут во много раз превышать приложенное напряжение, чем и объясняется относительно низкое значение реальной прочности.

В неидеально хрупких твердых телах после разрыва связей атомы участвуют еще в пластических микродеформациях сдвига, на что затрачивается дополнительная работа внешних сил.

Вязкому разрушению твердых тел предшествует значительная пластическая деформация, при этом разрушение происходит в том месте образца, где образуется шейка малого сечения.

Кроме вязкого разрушения, твердые тела могут испытывать хрупкое разрушение, наступающее после малой предварительной пластической деформации или вообще без нее. Хрупкое разрушение наблюдается часто у неметаллов или металлов при очень низких температурах.

Хрупкое разрушение должно происходить в результате мгновенного разрыва межатомных связей по плоскости, перпендикулярной действующему нормальному напряжению. Оценка теоретического напряжения (теоретической прочности), при котором должно происходить хрупкое разрушение, показывает, что эта величина связана с модулем упругости соотношением $\sigma_m \approx 0,1E$. Более точным является значение теоретической прочности:

$$\sigma_m = \sqrt{\gamma_s E/a}, \quad (1.32)$$

где γ_s – удельная поверхностная энергия; a – межатомное расстояние; E – модуль упругости.

Для стекла $E = 8 \cdot 10^{10}$ Па, следовательно, теоретическая прочность должна составлять $8 \cdot 10^9$ Па. Техническая, или реальная, прочность составляет всего $8 \cdot 10^7$ Па, т. е. она на два порядка ниже теоретической. Эта закономерность имеет место для большинства твердых тел.

Первая попытка объяснить такое расхождение была сделана А. Гриффитсом в 1920 г. Для объяснения низкой реальной прочности стекла Гриффитсом было сделано предположение, что в твердом теле существуют микротрещины, которые играют роль концентраторов напряжений. Гриффитс описал хрупкое разрушение твердого тела как процесс превращения упругой энергии, сосредоточенной в объеме твердого тела при приложении нагрузки, в поверхностную энергию его частей, образовавшихся при разрушении. На основе этого предположения Гриффитс предложил метод расчета технической прочности, согласно которому полное изменение энергии пластины T единичного объема, связанное с образованием трещины, вычисляется по формуле

$$T = U - W = 2\gamma_s L - \frac{\pi\sigma^2 L^2}{4E}, \quad (1.33)$$

где U – затрата энергии на возникновение поперечной трещины длиной L с образованием двух новых поверхностей с удельной поверхностью γ_s ; W – упругая энергия пластины, к которой приложено растягивающее напряжение; σ – прочность материала.

Если длина трещины такова, что $\partial T / \partial L = 0$, то трещина находится в состоянии неустойчивого равновесия. Трещина большего размера быстро распространяется, т. к. упругая энергия при увеличении L уменьшается быстрее, чем увеличивается поверхностная энергия. Трещина меньшего размера расти не будет или вовсе закроется, поскольку в этом случае, наоборот, поверхностная энергия уменьшается быстрее, чем возрастает упругая энергия.

Критический размер трещины $L_{кр}$ находим, приравнявая к нулю производную $\partial T / \partial L$:

$$L_{кр} = 4\gamma_s E / \pi\sigma^2. \quad (1.34)$$

Из этой формулы можно оценить напряжение σ , достаточное для того, чтобы тело, содержащее трещину размером $L_{кр}$, разрушилось:

$$\sigma = 2\sqrt{\gamma_s \frac{E}{\pi L}}. \quad (1.35)$$

Условие нестабильного роста трещины было найдено Гриффитсом без рассмотрения напряженного состояния у кончика трещины, вблизи которого концентрируются напряжения.

Острая же трещина с радиусом в вершине, равным межатомному расстоянию a , приводит к локальному повышению напряжения до значения σ_{max} :

$$\sigma_{max} = \sigma(1 + 2\sqrt{L/2a}). \quad (1.36)$$

При $\sigma_{max} = \sigma_m$, где σ_m – теоретическая прочность, получим

$$\sigma = \sqrt{\gamma_s \cdot \frac{E}{2L}}. \quad (1.37)$$

Это означает, что, если в твердом теле имеется трещина длиной L с радиусом у вершины, равным a , то при достижении величины приложенного напряжения σ локальное напряжение у вершины трещины достигнет теоретического значения σ_m и трещина распространяется вплоть до разрушения пластины.

Микротрещины, являющиеся причиной хрупкого разрушения, могут возникать в твердом теле как в процессе его получения, так и при последующей механической или термической обработке, а также под воздействием на твердое тело окружающей среды (газы, пыль и т. д.).

Самый простой способ удаления поверхностных микротрещин – удаление поверхностного слоя путем травления. Так, после погружения кристаллов поваренной соли в воду ее прочность на разрыв возрастает с $4,9 \cdot 10^6$ до $1,6 \cdot 10^9$ Па, что близко к теоретической прочности. Резко возрастает прочность образцов силикатного стекла при обработке их поверхности плавиковой кислотой.

Согласно Гриффитсу, реальную прочность твердых тел, имеющих микротрещины, можно вычислить из соотношения (1.37).

Если в это соотношение подставить значения γ_s , E и σ_p (реальная прочность) для меди ($\gamma_s = 1,7$ Дж/м²; $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па; $\sigma_p = 1,8 \cdot 10^8$ Па), то можно рассчитать длину микротрещины $L \approx 8 \cdot 10^{-6}$ м. Примерно такие же значения получаются и для других твердых тел. Микротрещины могут возникать в процессе получения твердого тела и особенно при его механической обработке. Об этом свидетельствует, в частности, резкая зависимость прочности от размера образца, особенно в области малых размеров. Так, у стеклянной нити диаметром 2,5 мкм прочность почти в сто раз больше, чем у массивных образцов. Объясняется это тем, что с уменьшением размера образца уменьшается и вероятность появления в нем большой трещины, приводящей к низкой прочности. Такая зависимость прочности от размера образца получила название масштабного фактора.

Механические свойства тугоплавких неметаллических и силикатных материалов, как, впрочем, и всех твердых тел, оценивают по пределу их прочности при сжатии, растяжении, статическом и динамическом изгибах, скручивании, а также по модулям упругости и сдвига.

1.7.2. Определение прочности при сжатии

Оборудование и материалы: гидравлический пресс с измерительной системой, штангельциркуль, шлифовальный круг, образцы твердого тела.

Пределом прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ называют максимальное напряжение, при котором материал разрушается под действием сжимающих усилий.

При определении прочности при сжатии используют не менее 3 образцов в виде кубиков с ребром 4–5 мм или цилиндров, диаметр и высота которых равны 5 мм. Поверхности образцов должны быть плоско параллельными, стеклянные образцы – хорошо отожжены.

Установка для определения прочности включает гидравлический пресс и измерительную систему. Перед началом испытаний необходимо включить измерительную систему и прогреть ее в течение 30 мин.

Образец помещают в центре плиты пресса и закрывают рабочую зону защитной крышкой. Устанавливают уровень защиты 20 кН. Нажимают кнопку «Пуск» и устанавливают скорость нагружения (от 0,25 до 50 кН/с).

Включают гидравлический насос кнопкой «Насос», ручкой «Режим работы» подают нагрузку на образец. Скорость подачи нагрузки на испытуемый образец регулируют ручкой «Скорость».

При разрушении образца на табло измерительной системы высвечивается максимальное значение нагрузки P , кН. Ручкой «Режим работы» сбрасывают нагрузку и устанавливают ручку на «Ноль». Сбрасывают отчет нажатием кнопки «Пуск».

Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ вычисляют по формуле

$$\sigma_{сж} = P/S , \quad (1.38)$$

где P – разрушающая нагрузка, Н; S – площадь поперечного сечения образца, м².

Предел прочности при сжатии материала определяется как среднее арифметическое результатов определения $\sigma_{сж}$ всех образцов.

Результаты измерений и расчетов заносят в табл. 1.14.

Таблица 1.14

Результаты измерений и расчетов

№	Размеры образца, м	Площадь поперечного сечения, м ²	Разрушающая нагрузка P , Н	$\sigma_{сж}$, МПа

1.7.3. Определение прочности при изгибе

Оборудование и материалы: гидравлический пресс с измерительной системой, штангельциркуль, шлифовальный круг, образцы твердого тела.

Пределом прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ называют максимальное напряжение, при котором материал разрушается под действием изгибающих усилий.

При определении прочности на изгиб $\sigma_{изг}$, Н/м²(Па), определяют значение разрушающего изгибающего момента M , Н·м, которое относят к моменту сопротивления образца W , м³:

$$\sigma_{изг} = M/W . \quad (1.39)$$

Образцы готовят в виде балочек прямоугольного или квадратного сечения либо стержней круглого сечения. Толщина образцов должна превышать расстояние между опорами не менее чем в 5 раз.

При испытаниях на изгиб используется метод нагружения образца сосредоточенной силой (трехточечный изгиб). Образец устанавливают на

опоры, выполненные в виде трехгранных призм с закругленным верхним ребром (рис. 1.25), и нагружают до разрушения.

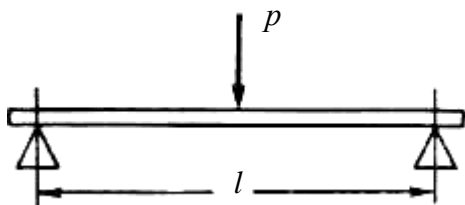


Рис. 1.25. Схема нагрузки при трехточечном изгибе

Определение предела прочности при изгибе выполняется с помощью гидравлического прессы и измерительной системы. Последовательность измерения такая же, как и при измерении прочности при сжатии.

Прочность на изгиб рассчитывают по следующим формулам:

– для образцов круглого сечения:

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{M}{W} = \frac{8Pl}{\pi d^3}; \quad (1.39)$$

$$f = \frac{4Pl^3}{3\pi E d^4}; \quad (1.40)$$

– для образцов прямоугольного сечения:

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{M}{W} = \frac{3Pl}{2bh^2}; \quad (1.41)$$

$$f = \frac{Pl^3}{4Eb h^3}. \quad (1.42)$$

Здесь M – изгибающий момент, Н·м; W – момент сопротивления, м³; P – разрушающая нагрузка, Н; l – расстояние между опорами, м; d – диаметр образца круглого сечения, м; b – ширина образца, м; h – толщина образца, м; f – прогиб образца к моменту разрушения.

Для получения среднего значения проводят не менее 3 испытаний. Результаты, которые существенно отклоняются от среднего значения, в расчет не принимаются.

Результаты испытаний заносят в табл. 1.15.

Таблица 1.15

Результаты испытаний

№ образца, характеристика	Расстояние между опорами l , м	Размеры сечения образца		Разрушающая нагрузка P , Н	Предел прочности при изгибе $\sigma_{\text{изг}}$, Па	Среднее значение предела прочности при изгибе $\sigma_{\text{изг}}$, Па
		ширина b , м	Толщина h , м			

1.7.4. *Определение микротвердости*

Оборудование и материалы: микротвердомер ПМТ-3, ручной пресс, пластилин, образцы с полированной поверхностью.

Твердость – способность поверхностного слоя материала сопротивляться деформации или разрушению. Твердость характеризует прочность поверхностного слоя материала при вдавливании индентора, царапании иглой, истирании абразивом и других способах воздействия.

Значения твердости различных типов материалов показывает следующее:

1) металлы, обладающие большим модулем Юнга, имеют и большую твердость. Это и понятно, если учесть, что пластическая деформация наступает при превышении предела текучести, а металлы с большим модулем Юнга как раз и имеют большие значения σ_m ;

2) керамика, как правило, разрушается в пределах упругого поведения. Поэтому появление отпечатка при вдавливании индентора (пластическая деформация) часто сопровождается локальным разрушением материала (появление трещин). Таким образом, для хрупких материалов твердость является не только показателем сопротивления пластической деформации, но и показателем сопротивления разрушению.

Количественно твердость определяется одним из следующих методов: вдавливание в образец индентора (статическая твердость), деформация при динамической нагрузке (динамическая твердость), царапание или истирание абразивом. Наибольшее распространение получили методы определения статической твердости.

В методе Бринелля в качестве вдавливаемого индентора используют стальной шарик диаметром 1,0 мм. Величина создаваемой при вдавливании нагрузки достигает 300 Н. Твердость определяется отношением нагрузки к площади отпечатка.

В приборе Роквелла индентором является стальной шарик (для мягких материалов) или алмазный конус с полусферической вершиной (для твердых материалов). Твердость определяют по разности глубины отпечатков при различных значениях нагрузки.

При определении твердости стекол и ситаллов наиболее часто используют метод Виккерса – вдавливание прямоугольной в основании алмазной пирамиды с углом у вершины 136° . Показатели так называемой микротвердости определяются размерами отпечатков, которые составляют десятки и сотни микрометров при определенной нагрузке. Значения твердости по Виккерсу некоторых материалов приведены в табл. 1.16.

Для измерения микротвердости по методу Виккерса применяют микротвердомер ПМТ-3 (рис. 1.26), который состоит из основания, колонки, предметного столика, винтового окулярного микрометра, нагружающего механизма, осветителя, системы объективов. Предметный столик может крестообразно перемещаться на 10 мм во взаимно перпендикулярных направлениях при помощи микрометрических винтов. Величина перемещения столика фиксируется с помощью отсчетного приспособления с точностью до

10 мкм. При помощи рукоятки предметный столик может быть повернут на 180°.

Таблица 1.16

Значения твердости материалов по Виккерсу

Материал	Состояние	Твердость H , МПа
Алюминий	Отожженный	200
	Холоднокатанный	400
Мягкая сталь (0,2% с)	Нормализованная	1 200
	Холоднокатанная	2 000
Al ₂ O ₃	–	15 000
Алмаз	–	60 000–100 000
Кварцевое стекло	Отожженное	7 000–7 500
Оконное стекло	Отожженное	5 400–5 800
Ситалл	Твердое	8 000–10 000

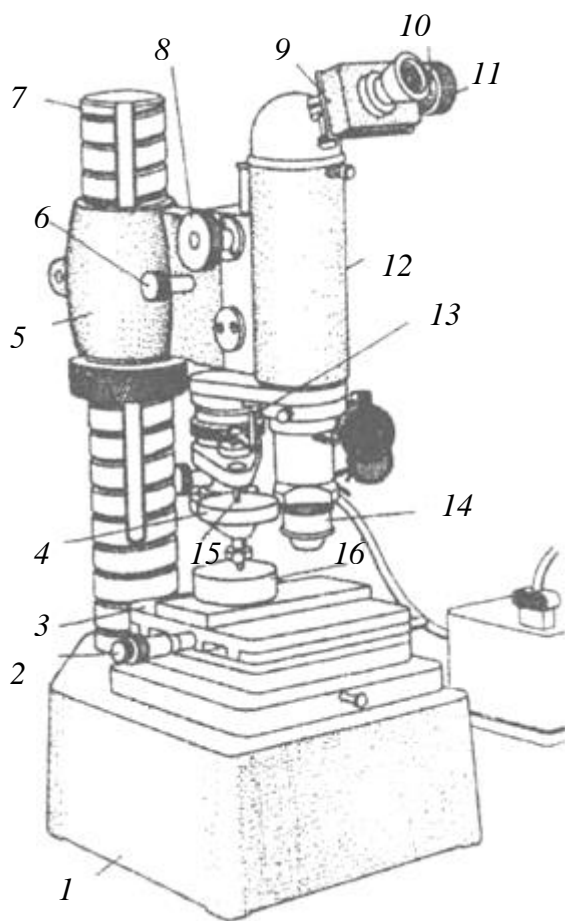


Рис. 1.26. Микротвердомер ПМТ-3 для измерения микротвердости материалов: 1 – основание; 2 – микрометрический винт; 3 – предметный столик; 4 – груз; 5 – кронштейн; 6 – винт микрометрического перемещения; 7 – колонка; 8 – винт грубого перемещения; 9 – окуляр-микрометр; 10 – отсчетный барабан; 11 – микрометрический винт окуляр-микрометра; 12 – тубус микроскопа; 13 – рукоятка; 14 – объектив; 15 – шток; 16 – образец

исходное положение. Образец перемещают вращением микрометрических винтов предметного столика на 2–3 деления и последовательно делают серию уколов.

Предметный столик плавно возвращают в исходное положение, вращая его по часовой стрелке до упора. Включают осветитель, устанавливают резкое изображение отпечатка пирамидки. Измеряют диагональ отпечатка, подводя отпечаток с помощью микрометрических винтов предметного столика к перекрестию окуляр-микрометра. При этом две стороны перекрестия должны примыкать к двум сторонам отпечатка (рис. 1.27). Затем вращают

Для измерения микротвердости используют образцы в виде пластин размером 20×20 мм, одна сторона которых отполирована. Образец закрепляют с помощью пластилина и ручного пресса на съемной подставке. Подставку устанавливают на предметный столик и закрепляют зажимами.

Помещают груз на верхнюю площадку штока, в нижний конец которого вставлена оправка с алмазной пирамидкой. Обычно масса груза составляет 0,1 кг, хотя в зависимости от твердости используют также грузы массой 0,05 и 0,2 кг.

Включают осветитель микроскопа, находят поверхность образца. При вращении микрометрических винтов предметного столика выбирают место без механических повреждений для укола. При фокусировке поверхности образца необходимо следить, чтобы объектив не касался поверхности образца.

Поворачивают предметный столик против часовой стрелки до упора. Медленно (в течение 10–15 с) поворачивают рукоятку штока против часовой стрелки. При этом шток опускается, и под действием нагрузки алмазная пирамидка вдавливается в выбранный участок поверхности. После выдержки в течение 5 с алмазную пирамидку поднимают, повернув рукоятку по часовой стрелке в

микрометрический винт окуляр-микрометра до совмещения перекрестия с двумя противоположными сторонами отпечатка и производят отсчет числа делений n по измерительному барабану.

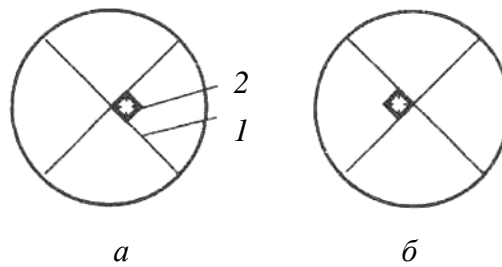


Рис. 1.27. Измерение диагонали отпечатка алмазной пирамидки:

1 – риски; 2 – отпечаток алмазной пирамидки

Рассчитывают микротвердость материала по формуле

$$H = \frac{1818,8P}{l^2}, \quad (1.44)$$

где H – микротвердость материала, МПа; P – нагрузка, кг; l – диагональ отпечатка, мм, которая определяется произведением числа делений на отсчетном барабане n на цену деления (0,0031 мм) (здесь n – среднее число делений из 10 измерений).

Для повышения надежности и достоверности результатов определения микротвердости на каждый исследуемый образец наносят не менее 10 уколов алмазной пирамидкой.

Результаты определений и расчетов заносят в табл. 1.17.

Таблица 1.17

Результаты определений и расчетов

Тип материала	Нагрузка на индентор, кг	Количество делений n	Длина диагонали, мм	Микротвердость, МПа