

**Кузьменко А.Г.**Хмельницкий национальный университет,  
г. Хмельницкий, Украина**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ИНДЕНТИРОВА-  
НИЯ ПОВЕРХНОСТИ  
ШАРОМ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ НОВЫХ МЕХА-  
НИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛА****Содержание**

Введение

1. Определение твердости по Бринеллю.
2. Метод испытаний металлов на сжатии по ГОСТ 25.503-97
  - 2.1. Основные положения, термины и определения
  - 2.2. Механические характеристики
3. Построение диаграммы упруго-пластического вдавливания шара
  - 3.1. Определение контактных перемещений при вдавливании по индикатору
  - 3.2. Этапы построения диаграммы: состоят в следующем
4. Определение давлений по силам вдавливания, и деформаций по контактным перемещениям
  - 4.1. Определение давлений
  - 4.2. Приближенное определение деформации
  - 4.3. Определение нагрузки упругого деформирования в конце сжатия
5. Элементы модели при деформирования поверхности пластическом вдавливании шара
  - 5.1. Нагрузка начала упругого вдавливания до появления пластических деформаций.
  - 5.2. Эффект А. Мартенса.
  - 5.3. Коэффициент пластической работы при вдавливании шара, как новая механическая характеристика металла
  - 5.4. Модуля упрочнения металла
  - 5.5. Процесс упругого вдавливание шара на последней стадии вдавливания
6. Примеры определения новых механических металлов по вдавливанию шара
  - 6.1. Порядок испытаний
  - 6.2. Пример испытаний армко-железа
  - 6.3. Обобщение результатов испытаний разное сплавов
7. Обсуждение результатов и заключение

Литература

**1. Определение твердости по Бринеллю**

$1^0$ . После вдавливания упругого шара в пластическую плоскость величина твердости по Бринеллю определяется как отношение силы  $Q$  вдавливания к площади шарового сегмента  $F_{HB}$

$$HB = \frac{Q}{F_{HB}} = \frac{Q}{\pi D u_0}. \quad (1.1)$$

Из геометрии пересечения окружности сферы и плоскости в первом приближении следует

$$u_0 = \frac{(d/2)^2}{2R} = \frac{d^2}{8R}. \quad (1.2)$$

Из более точного рассмотрения этой геометрии следует

$$u_0 = \frac{1}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2}), \quad (1.3)$$

или

$$u_0 = \frac{D}{2}(1 - \sqrt{1 - d^2/D^2}). \quad (1.4)$$

После подстановки (1.3) в (1.1) получаем общеизвестную формулу для определения твердости по Бринеллю

$$HB = \frac{2Q}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (1.5)$$

или

$$HB = \frac{Q}{\pi D u_0}. \quad (1.6)$$

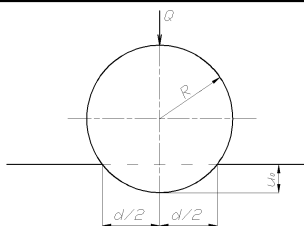


Рис. 1.1 – Схема вдавливания шара в плоскость

2<sup>0</sup>. Твердость по Бринеллю, стандартизованная по ГОСТ 9012-59, это точечная характеристика механических свойств поверхности. Так как в действительности *HB* зависит от нагрузки, диаметра шарика и других факторов, то в стандарте строго оговариваются условия проведения испытаний.

В частности требуется выполнять: толщину образца  $10\sqrt{d}$ ; расстояние между отпечатками  $44d$ ; при диаметре отпечатка  $0,2 - 0,6\sqrt{d}$ ; твердость не выше  $450 \text{ кг/мм}^2$ . Наибольшее влияние на твердость по Бринеллю оказывает величина нагрузки испытаний и диаметр шарика.

В табл. 1 даны рекомендации по выбору диаметра шарика для испытаний: 10 мм, 5 мм или 2,5 мм в зависимости от толщины испытываемого материала. Вместе с тем измеренная твердость при вдавливании шарика от начальной нулевой нагрузки до конечной существенно увеличивается, в отдельных случаях в 2 раза.

Таблица 1

**Выбор диаметра шарика и нагрузки в зависимости от твердости и толщины испытываемого образца (ГОСТ 6012-59)**

Материал	Интервал твердости в числах Бринелля	Минимальная толщина испытываемого образца, мм	Соотношение между нагрузкой и диаметром	Диаметр шарика <i>D</i> , мм	Нагрузка <i>P</i> , кг	Выдержка под нагрузкой, сек
Черные металлы	> 140	6 - 3	$P = 30P: 100^3$	10	3000	10
		4 - 2		5	750	
		Менее 2		2,5	187,5	
То же	< 140	Более 6	$P = 10P: 100^3$	10	1000	10
		6 - 3		5	250	
		Менее 3		2,5	62,5	
Цветные металлы	> 130	6 - 3	$P = 30P: 100^3$	10	3000	30
		4 - 2		5	750	
		Менее 2		2,5	187,5	
То же	35 - 130	9 - 3	$P = 10P: 100^3$	10	1000	30
		6 - 3		5	250	
		Менее 3		2,5	62,5	
Цветные металлы	8 - 35	Более 6	$P = 2,5P: 250^3$	10	250	60
		4 - 3		5	62,5	
		Менее 3		2,5	15,6	

Из этого обстоятельства следует, что информация заложенная, в диаметре площадке вдавливания шарика, используется не в полной мере. Во-первых, твердость зависит от нагрузки испытаний, но и от нагрузки, при которой работает деталь. Во-вторых, при практическом использовании не учитывается факт и закономерность упрочнения поверхности от нагрузки.

3<sup>0</sup>. При отсутствии точной информации о распределении контактных давлений по площадке контакта при вдавливании шарика в пластическую поверхность используются приближенные представления. В случае метода Бринелля вообще используется условное равномерное давление на развертку площадки сферического отпечатка.

Метод Бринелля еще во время его создания (1909 г.) подвергался критике Майером, который полагал, что более правильным является определение твердости, как отношения силы к площади проекции отпечатка под шариком:

$$HM = \sigma_{cp} = \frac{4Q}{\pi d^2}, \quad (1.7)$$

где  $HM$  равна среднему давлению на проекцию отпечатка.

4<sup>0</sup>. Отношение твердости по Майеру и Бринеллю получим разделив выражение (1.6) на (1.7):

$$HM = \frac{4Q}{\pi d^2}; \quad \boxed{\frac{HM}{HB} = 2 \frac{(1 - \sqrt{1 - d^2 / D^2})}{d^2 / D^2}}$$

Для примера при  $D = 10$  при  $d / D = 0,4055$ , имеем  $\frac{HM}{HB} = 2 \frac{1 - \sqrt{1 - 0,1644}}{0,1644} = 1,04487$ ,

$$HB = \frac{HM}{1,04487}.$$

## 2. Метод испытаний металлов на сжатии по ГОСТ 25.503-97

### 2.1. Основные положения, термины и определения

1<sup>0</sup>. Стандарт устанавливает:

1) методику; испытания образцов на сжатии при построении кривой упрочнения; 2) форму математической зависимости между напряжением течения  $\sigma_s$  и степенью деформации  $\varepsilon_e$  и оценку параметров степенного уравнения:

$$\sigma_s = \sigma_{s1} \varepsilon_e^n, \quad (2.1)$$

где  $\sigma_{s1}$  – напряженные течения при  $\varepsilon_e^n = 1$ ,  $n$  – показатель деформационного упрочнения.

2<sup>0</sup>. Механические характеристики, кривая упрочнения и ее параметры, могут быть использованы в случаях:

1) выбора металлов; 2) обоснования конструктивных решений; 3) приемочного контроля; 4) разработки технологических процессов; 5) расчетов на прочность деталей машин.

3<sup>0</sup>. Определения:

1) диаграмма испытаний (сжатия): график зависимости нагрузки от абсолютной деформации (укорочения) образца;

2) кривая упрочнения: график зависимости напряжения течения от логарифмической деформации;

3) осевая сжимающая нагрузка: нагрузка, действующая на образец в данный момент испытания;

4) условное номинальное напряжение  $\sigma$ : напряжение, определяемое отношением нагрузки  $Q$  к начальной площади поперечного сечения  $F_0$ :

$$\sigma = \frac{Q}{F_0}; \quad (2.2)$$

5) напряжение течения  $\sigma_s$ : напряжение, превращающее предел текучести, определяемое отношением нагрузки  $Q$  к действительной нагрузке для данного момента испытаний с помощью  $F$ :

$$\sigma_s = \frac{Q}{F}; \quad (2.3)$$

6) предел пропорциональности при сжатии  $\sigma_{\text{пр}}$ : напряжение, при котором отступление от линейной зависимости между нагрузкой к абсолютным укорочением образца достигает такого значения, при котором тангенс угла наклона увеличивается на 0,05 % в сравнении с линейным;

7) предел упругости при сжатии  $\sigma_{0,05}$ : напряжения, при котором относительная остаточная деформация (укорочение  $e$ ) достигает 0,05 % начальной высоты образца;

8) предел текучести (физический) при сжатии  $\sigma_T$ : наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения сжимающей нагрузки;

9) условный предел текучести при сжатии  $\sigma_{0,2}$  напряжение, при котором относительная остаточная деформация (укорочение) образца достигает 0,2 %, первоначальной расчетной высоты образца;

10) предел прочности при сжатии: напряжение соответствующие наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению;

11) показатель деформационного упрочнения  $n$ :

$$\sigma_s = \sigma_1 \varepsilon^n, \quad (2.4)$$

характеризующий способность металла к упрочнению при равномерной пластической деформации.

6<sup>0</sup>. Испытания по стандарту проводят на образцах трех типов: 1) цилиндрические; 2) призматические и квадратные с гладкими торцами; 3) призматические и квадратные с торцевыми выточками.

Размеры образцов задаются по стандарту; 4) для построения кривых упрочнения применяются только цилиндрические образцы.

7<sup>0</sup>. Испытания проводят на машинах сжатия всех систем и ГОСТ 28840, с записью диаграмм деформирования.

Все механические характеристики получают путем обработки соответствующих диаграмм сжатия по методикам, изложенным в стандарте.

**2.2. Механические характеристики** схематизированных диаграмм пластических материалов, используемые в расчетах:

1) диаграмма деформирования пластического материала чаще всего в расчетах схематизируется кусочно-линейной зависимостью без площадки текучести с линейным упрочнением, (рис. 2.1).

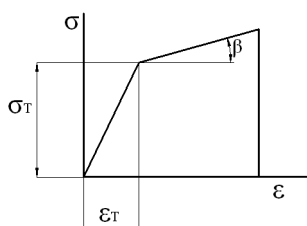


Рис. 2.1 – Кусочно-линейная схематизация диаграммы сжатия материала

2) уравнения этой диаграммы записываются в виде:

$$\begin{aligned} \sigma &= E\varepsilon, \quad \varepsilon < \varepsilon_T, & \text{б} \\ \sigma &= \sigma_T + \varepsilon_T(\varepsilon - \varepsilon_T), \quad \varepsilon > \varepsilon_T \end{aligned} \quad (2.5)$$

3) или после преобразований:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_T + E_T\varepsilon + E_T\varepsilon_T, & \text{б} \\ \sigma &= \sigma_T \left( 1 - \frac{E_T}{\sigma_T} \varepsilon_T \right) + E_T\varepsilon, & \text{п} \\ \sigma &= \sigma_T \left( 1 - \frac{E_T}{E} \varepsilon_T \right) + E_T\varepsilon = \sigma_T \lambda + E_T\varepsilon, & \text{п} \end{aligned} \quad (2.6)$$

где

$$\begin{aligned} \sigma &= E\varepsilon, \quad \varepsilon < \varepsilon_T, & \text{б} \\ \sigma &= \sigma_T \lambda + E_T\varepsilon, \quad \varepsilon > \varepsilon_T \end{aligned} \quad (2.7)$$

4) здесь  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  – напряжения в растягиваемом или сжимаемом образце;  $\sigma_T$  – предел текучести;

$$E_T = \frac{\sigma - \sigma_T}{\varepsilon - \varepsilon_T} = \text{tg}\beta \quad \text{tg}\beta, \quad (2.8)$$

модуль упрочнения материала;

$\varepsilon_T$  – деформация при напряжениях равных пределу текучести;

$$\lambda = \frac{E_T}{E}, \quad (2.9)$$

параметр упрочнения материала;

$E$  – модуль упругости материала;

5) Приближенно функция кривой пластического деформирования может быть представлена в виде простой степенной функции вида

$$\sigma = k\varepsilon^n, \quad (2.10)$$

где  $k$ ,  $n$  – параметры функции упрочнения.

### 3. Построение диаграммы упруго-пластического вдавливания шара

#### 3.1. Определение контактных перемещений при вдавливании по индикатору

1<sup>0</sup>. Диаграмму вдавливания шара невозможно построить, имея только размеры отпечатка шара, как это делается при определении твердости по Бринеллю. Для построения диаграммы необходимо иметь контактные перемещения при нагрузке и при разгрузке шара.

Известны установки, на которых при пластическом вдавливании шара в плоскость изменяются контактные перемещения нагружения. Определенные величины упругого восстановления лунки при этом производится с большой погрешностью. Здесь предлагается способ уточнения измерения величин, восстановления лунки после разгрузки.

2<sup>0</sup>. Способ состоит в следующем: 1) после основного нагружения с измерением полной глубины вдавливания шара  $u_0$  по индикатору; 2) нагрузка снимается без измерения показаний индикатора; 3) предметный столик винтом подводится до соприкосновения поверхности лунки основного нагружения до поверхности шара; при этом задается стандартная предварительная нагрузка порядка 10 кг; индикатор устанавливается на нуль; 4) производится загрузка на поверхность восстановленной лунки; образец разгружается; 5) по индикатору определяется величина упругого вдавливания до полной нагрузки; эта величина равна величине  $u_e$  упругого восстановления лунки.

3<sup>0</sup>. При наличии значений полного  $u_0$  контактного перемещения и величины упругого восстановления  $u_e$  величина идеально пластических перемещений  $u_p$  определяется по разности:

$$u_p = u_0 - u_e. \quad (3.1)$$

#### 3.2. Этапы построения диаграммы: состоят в следующем

Этап 1.  $OA_7$  – (рис. 3.1) построение по экспериментальным данным зависимости полной глубины вдавливания  $u_0$  от нагрузки  $Q$ .

1) функция, соответствующая этому графику может быть представлена в степенной форме:

$$Q = cu_0^n; \quad (3.2)$$

2) параметры  $c$ ,  $n$  этой аппроксимации могут быть точно определены методом наименьших квадратов; параметры могут быть определены по координатам двух точек, взятых на зависимости;

3) например можно взять точки с координатами:

$$\begin{aligned} (Q_1 = 500 \text{ \u044d\u0430; } u_{01}(Q = 500 \text{ \u044d\u0430}); & \text{ б} \\ (Q_2 = 3000 \text{ \u044d\u0430; } u_{02}(Q = 3000 \text{ \u044d\u0430}); & \text{ \u0439}; \end{aligned} \quad (3.3)$$

4) в этом случае параметры, определяются по формулам:

$$n = \frac{\lg Q_1 / Q_2}{\lg u_{01} / u_{02}}, \quad c = \frac{Q_1}{u_{01}^n}. \quad (3.4)$$

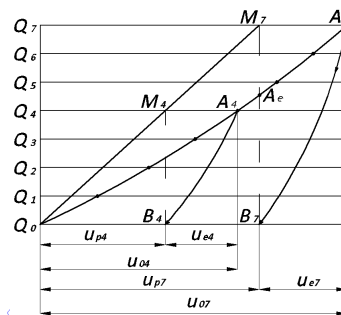


Рис. 3.1 – Графики диаграммы вдавливания и разгрузки:  
 $A_i$  – точки  $(Q, u_0)$  – нагрузки;  $B_i$  – точки разгрузки;  
 $M_i$  – точки чисто пластической деформации точки линии Мартенса;  
 $A_E$  – точка завершения пластических и нала упругих деформаций.

Этап 2.  $A_7 - B_0$  - этап полной разгрузки; линия проводится приближенно: точно заданы только крайние точки  $A_7$  и  $B_0$ .

Этап 3.  $A_7 - B_0 - A_E - M_7$  - этап определения координат особых точек  $A_E$  и  $M_7$ :

1)  $A_E$  - проводя из точки  $B_0$  до пересечения с линией  $OA_7$  находим координаты точки  $A_E$  начала упругого упрочнения ( $M_{EP}, Q_E$ );

2)  $M_7$  - продолжая перпендикуляр к оси  $u$  до пересечения с линией  $Q_7A_7$ , получаем точку  $M_7$  с координатами ( $Q_7, M_7$ ) это точка Мартенса с завершением чисто пластических деформаций.

3) определяя точки Мартенса при разных нагрузках, получаем линию близкую к прямой, линию Мартенса  $OM_7$ .

#### 4. Определение давлений по силам вдавливания, и деформаций по контактными перемещениям

##### 4.1. Определение давлений

В работа [2] вариационно-экспериментальным методом в контактной механике была получена зависимость максимальных контактных давлений от нагрузок на шар. При этом используются параметры  $c$  и  $n$  функции диаграммы вдавливания шара:

$$Q = cu_0^n. \quad (4.1)$$

Максимальное контактное давление  $\sigma_0$  определяется по простой зависимости:

$$\sigma_0 = \sigma_{cp} n, \quad (4.2)$$

где  $\sigma_{cp}$  - среднее контактное диаметром  $d$  давление на проекцию отпечатка:

$$\sigma_{cp} = \frac{4Q}{\pi d^2}. \quad (4.3)$$

это выражение соответствует формуле определения твердости по Майеру.

**4.2. Приближенное определение деформации** под шаром по величине контактных перемещений. Деформируемый объем при вдавливании шара представим цилиндрическим стержнем высоты  $l$  равной толщине образца испытываемого металла; диаметр стержня принимаем равным диаметру пятна пластического отпечатка  $d$  на образце.

Тогда при изменении высоты стержня на величины контактных перемещений  $u_0, u_e, u_p$  имеем соответствующие осевые деформации стержня под шаром:

$$\varepsilon_0 = \frac{u_0}{e}, \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_e = \frac{u_e}{e}. \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_p = \frac{u_p}{e}. \quad (4.6)$$

##### 4.3. Определение нагрузки упругого деформирования в конце сжатия

1) эта точка находится на диаграмме вдавливания, описываемой функцией

$$Q = cu_0^n; \quad (4.7)$$

2) координата  $u_0 = u_{oE}$  в которой начинаются упругие деформации равна

$$u_{oE} = u_0 - u_e; \quad (4.8)$$

3) подставляя эту координату в (4.7) получаем соответствующую силу

$$Q = Q_E = c(u_0 - u_e)^n. \quad (4.9)$$

#### 5. Элементы модели при деформировании поверхности пластическом вдавливании шара

Общую структуру основания можно условно представить состоящей из трех слоев или трех участков:

- 1) участок чисто упругого вдавливания до появления начала пластических деформаций;
  - 2) участок идеально пластического вдавливания, участок Мартенса;
  - 3) участок упругого вдавливания или участок упрочнения.
- Рассмотрим более детально эти участи.

### 5.1. Нагрузка начала упругого вдавливания до появления пластических деформаций

Расчет предельной нагрузки упругого деформирования и перехода в пластическое состояние может быть выполнен и определен на пересечении функций упругого по Герцу и упруго-пластического деформирования по диаграмме вдавливания.

1<sup>0</sup>. Расчет параметров контакта шара и плоскости на первом этапе вдавливания может быть выполнен по формулам Герца [1]: 1) радиус  $a$  круговой площадки контакта при упругом деформировании определяется по зависимости:

$$a = 1,109 \sqrt[3]{\frac{Q}{ER}} \sqrt[4]{\frac{1}{\psi}}^{1/3}; \quad (5.1)$$

2) максимальное контактное давление  $\sigma_0$  определяется по формуле:

$$\sigma_0 = 0,388 \sqrt[3]{\frac{QE^2}{R^2}} \sqrt[4]{\frac{1}{\psi}}^{1/3}; \quad (5.2)$$

3) максимальное контактное перемещение  $u_0$  определяется по формуле:

$$u_0 = 1,231 \sqrt[3]{\frac{Q}{E^2 R}} \sqrt[4]{\frac{1}{\psi}}^{1/3}. \quad (5.3)$$

2<sup>0</sup>. Нагрузка начала появления пластичности может быть определена из условия:

$$\sigma_0 \leq HB, \quad (5.4)$$

где  $\sigma_0$  – максимальное контактное давление,  $HB$  – твердость материала по стандарту.

Подставляя (5.2) в (5.4), получаем:

$$0,388 \sqrt[3]{\frac{Q_T E^2}{R^2}} \sqrt[4]{\frac{1}{\psi}}^{1/3} \leq HB, \quad (5.5)$$

где  $Q_T$  – нагрузка начала пластичности в контакте.

Из (5.5) определяется нагрузка начала пластичности:

$$Q_T = \sqrt[3]{\frac{HB}{0,388}} \sqrt[4]{\frac{R^2}{\psi}} E^2. \quad (5.6)$$

### 5.2. Эффект А. Мартенса

1) Еще в 1905 году А. Мартенсом [2] было установлено, что зависимость между пластическими перемещениями  $u_p$  и полной нагрузкой  $Q$ , действующей при этом, близка к линейной, имеет вид:

$$u_p = k_p Q, \quad (5.7)$$

где  $k_p$  – коэффициент пропорциональности;

2) для оценки точности зависимости (5.7) требуется выполнение дополнительных испытаний различных металлов.

### 5.3. Коэффициент пластической работы при вдавливании шара, как новая механическая характеристика металла

1. Полная (упругая и пластическая) работа вдавливания шара при наличии параметров  $C$  и  $n$  зависимости полного перемещения  $u_0$  от нагрузки  $Q$  по (3.2):  $Q = cu_0^n$ , может быть определена интегрированием:

$$A = \int_0^{u_0} Q du_0 = c \int_0^{u_0} u_0^n du_0 : \quad (5.8)$$

$$A = c \frac{u_0^{n+1}}{n+1} . \quad (5.9)$$

2. Работа чисто пластических деформаций может быть определена по функции Мартенса (5.7):

$$A_p = \frac{1}{2} u_p Q_{\max} , \quad (5.10)$$

где  $u_p = u_0 - u_e$ ;

$Q_{\max}$  – максимальная нагрузка вдавливания шара.

3. Работа упругой деформации может быть определена двумя способами:

1) по первому способу это разность полной работы и работы чисто пластических деформаций:

$$A_e = A - A_p ; \quad (5.11)$$

2) по второму способу, если снять координаты  $u_e$ ,  $Q_e$  разгрузки, а затем найти аппроксимирующую функцию:

$$Q = c_e u_e^{n_e} . \quad (5.12)$$

В этом случае для определения работы упругих деформаций интегрируя (32) имеем:

$$A_e = \int Q du_e = c_e \frac{u_e^{n_e+1}}{n_e+1} . \quad (5.13)$$

4. Коэффициент пластической работы характеристика пластических свойств материала с помощью твердости по Бринеллю является точечной.

Оценка пластических свойств по работе является более полной. Она дает возможность суммировать пластическую работу.

На практике удобнее использовать относительную величину:

$$\gamma_p = \frac{A_p}{A} , \quad (5.14)$$

которую далее будем называть коэффициентом пластической работы КПР или коэффициент диссипации при пластическом вдавливании шара.

**5.4. Модуля упрочнения металла** по вдавливанию шара может быть выполнена по аналогии с модулем упрочнения по стандартной диаграмме сжатия (при испытании стержня).

Будем определять модуль упрочнения металла, как отношение:

$$E_{TQ} = \frac{Q_{\max} - Q_E}{u_e} , \quad (5.15)$$

где  $Q_{\max}$  – максимальная сила сжатия;

$Q_E$  – сила, при которой начинаются упругие деформации при окончании участка чисто.

Процедуру обработки результатов испытаний по вдавливанию шара в плоскость рассмотрим на конкретных примерах. Данные по испытаниям используем из опубликованных ранее другими авторами.

### 5.5. Процесс упругого вдавливание шара на последней стадии вдавливания

1. Геометрические условия вдавливания шара на разных этапах начала контакта.

2. Ставится задача: 1) определить величину силы, при которой завершается конечный этап упругого вдавливания шара; 2) определить максимальные контактные давления, при которых завершается конечный этап упругого вдавливания.

3. Математическая задача ставится следующим образом: рассмотреть упругое контактное взаимодействие упругого выпуклого шара радиуса  $R$  и полый упругой сферы радиуса  $R_E$ : 1) либо под действием нагрузки  $Q_E$  (прямая задача); 2) либо при заданном контактном перемещении  $u_e$  с определением действующей силы  $Q_E$  (обратная задача).

4. Для решения поставленной задачи необходимо знать радиус сферической поверхности лунки после ее упругого восстановления.

При заданной величине упругого восстановления это геометрическая задача.

5. В первом приближении можно получать, что радиус восстановленной сферической поверхности больше радиуса шара на величину упругого восстановления.

$$R_E = R + u_e. \quad (5.16)$$

Очевидно, что это очень грубая оценка радиуса  $R_E$ . Далее приводится более точный подход.

6. Вывод формулы для определения  $R_E$ .

Из расчетной схемы рис. 5.1 следуют соотношения:

а)  $O_E A = R E$  ;  $A B = d / 2$  ;

б)  $O_E B = R_E - u_e$  ;

в) так как из  $\Delta O_E B A$  следует  $O_E B = R_E - u_e$ , то по теореме Пифагора:

$$(R_E - u_e)^2 + (d / 2)^2 = R_E^2 ; \quad (5.17)$$

д) преобразовывая получаем:

$$R_E^2 - 2R_E u_e + u_e^2 + (d / 2)^2 = R_E^2, \quad (5.18)$$

отсюда имеем:

$$R_E = \frac{(d / 2)^2 + u_e^2}{2u_e}. \quad (5.19)$$

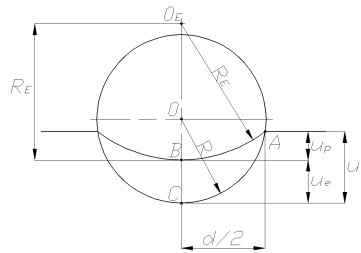


Рис. 5.1 – Схема к определению радиуса восстановленной поверхности  $R_E$

7. При взаимодействии шара с упругой сферической полостью по Герцу [1] величина сближения шара и плоскости или величина максимального контактного перемещения определяется по формуле:

$$u_e = 1,231 \sqrt[3]{\frac{Q^2}{E^2} \frac{R_E - R}{R R_E}} \quad (2.20)$$

отсюда может быть определена нагрузка упругих деформаций  $Q_E$

$$Q_e = \sqrt[3]{\frac{(1,231 u_0)^3 R R_E E^2}{R_E - R}} \quad (5.21)$$

8. При взаимодействии упругого шара с упругой сферической полостью по [1] величина сближения или максимального контактного перемещения, если материалы тел одинаковы, определяются по формуле:

$$u_0 = 1,231 \sqrt[3]{\frac{Q^2}{E^2} \frac{R_E - R}{R R_E}} \quad (5.22)$$

или с учетом (5.16):

$$u_0 = 1,231 \sqrt[3]{\frac{Q^2}{E^2} \frac{u_e}{R(R + u_e)}} \quad (5.23)$$

**6. Примеры определения новых механических характеристик металлов по диаграмме вдавливания шара**

### 6.1. Порядок испытаний

1. Для проведения испытаний необходимо иметь пресс Бринелля, оборудованный приспособлением для измерения величины перемещений шара относительно поверхности образца, например, с помощью индикатора часового типа.

2. При заданной на рычаге нагрузке  $Q_i$  производится нагружения с измерение полной глубины вдавливания  $u_{oi}$  по индикатору.

3. Производится разгрузка или снятие нагрузки  $Q_i$  без измерения перемещений шара по индикатору.

4. Производится повторное вдавливание нагрузкой  $Q_i$  шара в восстановленную поверхность лунки с измерением перемещения шара по индикатору; это перемещение  $u_{ei}$  равно величине упругого восстановления глубины лунки после первого нагружения.

5. Процесс нагружения и разгрузки производится при разных нагрузках например:  $Q_1: 500\ 500$  кг;  $Q_2: 1000\ 1000$  кг;  $Q_3: 1500\ 1500$  кг;  $Q_4: 2000\ 2000$  кг;  $Q_5: 2500\ 2500$  кг;  $Q_6: 3000\ 3000$  кг.

### 6.2. Пример испытаний армо-железа

1. Условия и данные испытаний сплава армо-железа представлены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Условия и данные испытаний армо-железа						
$u / Q$	500 кг	1000 кг	1500 кг	2000 кг	2500 кг	3000 кг
$u_0$ , мм	0,0149	0,292	0,421	0,55	0,686	0,813
$u_e$ , мм	0,029	0,0042	0,051	0,06	0,66	0,073
$u_p$ , мм	0,12	0,25	0,37	0,49	0,62	0,74
$d$ , мм	2,5	3,4	4,10	4,69	5,15	5,6
$HB$ , кг/мм <sup>2</sup>	-	-	-	-	12	117,
$HM$ , кг/мм <sup>2</sup>	101,8	110,14	113,6	115,77	120,02	121,8
$\sigma_0$ , кг/мм <sup>2</sup>	107,86	116,63	120,3	122,6	127,1	129
$\varepsilon = u_0 / l$	0,003	0,058	0,084	0,11	0,1372	0,1626

2. По данным таблицы строятся графики типа (рис. 3.1) диаграммы вдавливания  $OA_6$  и диаграммы разгрузки  $A_6B_6$  (приближенно принята по прямой линии). На пересечении вертикально линии  $B_6C_6$  с линией нагрузки  $Q_6: 3000\ 3000$  кг находим точку Мартенса  $C_6$ . Соединяя точки  $C_6$  и  $O$  получаем линию Мартенса  $OC_6$ .

3. Параметры аппроксимирующей функции диаграммы нагрузки:  $Q = cu_0^n$ , полученные методом наименьших квадратов равны:  $n: 1,059\ 1,059$ ;  $c: 3737\ 3737$  (кг/мм<sup>n</sup>).

4. Приближенно параметры  $n, c$  можно определить по двум точкам (3.3), (3.4), (3.5); при  $Q_1: 1000\ 1000$  кг;  $u_{01}: 0,292\ 0,292$ мм;  $Q_2: 3000\ 3000$ кг;  $u_{02}: 0,813\ 0,813$  мм:

$$n = \frac{\lg Q_1 / Q_2}{\lg u_{01} / u_{02}} = \frac{\lg 500 / 3000}{\lg 0,292 / 0,813} = 1,067 ;$$

$$c = \frac{Q_1}{u_{01}^n} = \frac{1000}{0,292^{1,067}} = 3719 \text{ кг/мм}^n.$$

5. Определение нагрузки начала последнего упругого этапа нагружения (вдавливания шарика):  
- перемещение при котором начинается последний этап упругого вдавливания шарика, равно:

$$u_E = u_p = u_0 = 0,813 - 0,073 = 0,74 ;$$

- подставляя это выражение в функцию нагружения, имеем:

$$Q_z = cu_p^n = 37270,74^{1,059} = 2709 \text{ кг.}$$

6. Определение твердости по Бринеллю по зависимости через глубину отпечатка дает:

$$HB = \frac{Q}{\pi Du_0} = \frac{3000}{\pi 41040,813} = 117,45 \text{ кг/мм}^2.$$

7. Определяя твердость по Майеру, получаем:  $\sigma_{cp} = HM = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 3000}{\pi 45,6^2} = 121,8 \text{ кг/мм}^2.$

8. Максимальное контактное давление  $\sigma$  на площадке контакта с учетом ВЭМ дает:

$$\sigma_0 = \sigma_{cp} n = 121,8 \cdot 1,059 = 129 \text{ кг/мм}^2.$$

Результаты определения твердости  $HB$  и  $HM$  при разных нагрузках приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

**Сводная таблица дополнительных механических характеристик поверхности металлов, определяемых по вдавливанию шара**

Параметр	армко-железо	Сталь 10	Сталь 35	Сталь 45	Сталь 10ХГСА	Магн. сплав МА2	Дуралюмин. Д1	Титан сплав ВТ3-1
$HB$ , кг/мм <sup>2</sup>	117,16	129,39	165,21	176	329,3	55	93,6	240,5
$HM$ , кг/мм <sup>2</sup>	121,8	143,46	184,5	197,3	392,4	202,85	95,05	346,5
$n$	1,067	1,034	1,127	1,16	1,3305	1,242	1,306	1,259
$c$ , кг/мм <sup>2</sup>	3719	4108	5566	6107	15574	1993	4378	9600
$\sigma_T^{\text{нec}}$ , кг/мм <sup>2</sup>	105	121,2	180	198,9	197,3	13,9	117,5	270
$E_T$ , кг/мм <sup>2</sup>	181	450,8	761	198,9	15028	5009	5164	1350
$\lambda_T$	0,009	0,0225	0,038	0,0396	0,7514	0,25	0,258	0,0675
$k_p$	0,91	0,894	0,848	0,83	0,793	0,85	0,294	0,604
$k_e$	0,09	0,106	0,152	0,175	0,207	0,146	0,206	0,395
$\lambda_p$	0,9367	0,9093	0,478	0,736	0,92	0,805	0,393	0,683
$Q_E$ , кг	2709	2673	2491	2418	2205	822	891,8	1592
$k_E$	0,903	0,891	0,83	0,806	0,735	0,822	0,492	053

9. Величину деформации  $\varepsilon$  в наиболее нагруженной точке получаем делением максимальных полных перемещений  $u_0$  на толщину образца  $l$ ; для армко-железа  $l = 5$  мм; при  $Q = 3000$  кг;

$$u_0 = 0,813 \text{ мм}; \varepsilon = \frac{0,813}{5} = 0,1626.$$

10. Работа  $A_p$  пластических деформаций:  $A_p = \frac{1}{2} u_p Q = 0,74 \cdot 3000 / 2 = 1110$  кг·мм; полная работа  $A$  деформации при вдавливании шара по (5.9):

$$A = c \frac{u_0^{n+1}}{n+1} = \frac{37374813^{2,059}}{2,059} = 1185 \text{ кг·мм.}$$

11. Коэффициент пластической работы для армко-железа определяется по (5.14):

$$\gamma_p = \frac{A_p}{A} = \frac{1110}{1185} = 0,9367.$$

$$12. \text{ Коэффициент пластического сжатия } k_p = \frac{u_p}{u_0} = \frac{0,74}{0,813} = 0,91.$$

$$13. \text{ Коэффициент упругого сжатия } k_e = \frac{u_e}{u_0} = \frac{0,073}{0,813} = 0,09.$$

14. Построения диаграммы сжатия сплава армко-железа производим по данным о значениях  $\sigma_0$  и  $\varepsilon$ , полученных в п. (8, 9).

15. Предел текучести  $\sigma_T^{\text{н\acute{e}c}}$  армко-железа при сжатии определяем по перегибу диаграммы сжатия:

$$\sigma_T^{\text{н\acute{e}c}} = 105 \text{ кг/мм}^2.$$

16. Определение модуля упрочнения производится по соотношениям:  $E_T = \frac{\Delta \sigma_0}{\Delta \varepsilon}$ :

$$\Delta \sigma_0 = \sigma_0(3000) - \sigma_T^{\text{н\acute{e}c}} = 129 - 105 = 24 \text{ кг/мм}^2;$$

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon(3000) - \varepsilon(\sigma_T^{\text{н\acute{e}c}}) = 0,1626 - 0,03 = 0,1326;$$

$$E_T = \frac{24}{0,1326} = 181 \text{ кг/мм}^2.$$

17. Параметр упрочнения находим из соотношения  $\lambda_T = \frac{E_T}{E} = \frac{181}{2010^4} = 0,009$ .

### 6.3. Обобщение результатов испытаний разных сплавов

Далее приводятся результаты обработки фактических данных испытаний по вдавливанию шара и приведенных в качестве Дрозда М.С. [3].

## 7. Обсуждение результатов и заключение

1. *Достоинства и недостатки метода индентирования или испытания поверхности вдавливанием шара:*

1) определение твердости этой основной механической характеристики поверхности материала, путем вдавливания твердых инденторов является основным методом в трибоматериаловедении. Разновидности метода возникают при инденторах разной формы и размеров. Конечным результатом во всех методах является определение твердости как отношения нагрузки к площади контакта, при которой возникают или завершаются пластические деформации;

2) твердость является интегральной характеристикой свойств материала. В этом состоит как ее основное достоинство, так и главный недостаток. Только по твердости нельзя судить о процессах деформирования в контакте деталей. Дифференциальные механические характеристики получают в частности при стандартных испытаниях на растяжение и сжатие;

3) твердость является точечной и однокоординатной механической характеристикой на процессе вдавливания. Одной твердости недостаточно для того, что бы описать процесс деформирования с определением его энергетических параметров. В то же время необходимо также описывать процессы при разработке теории прочности. И при разработке методов моделирования процессов изнашивания;

4) в тоже время метод определения механических свойств поверхности путем пластического вдавливания жестких шара, клина-конуса и т.д. предельно прост и дает достаточно стабильные результаты;

5) В связи с изложенным в данной работе ставилась задача использовать метод индентирования для определения как дифференциальных как механических свойств поверхности, так и энергетических характеристик механических свойств материала.

2. *Определение перемещений при вдавливании:*

1) для решения поставленной задачи необходимо, прежде всего, иметь возможность определить перемещения в контакте при вдавливании шара. Традиционно после пластического вдавливания измеряется только диаметр круговой лунки;

2) известны установки типа пресса Бринелля, на которых перемещения шара при вдавливании изменяются с помощью инденторов часового типа, связанных с рычагами. Перемещения пластического вдавливания при нагружении при этом измеряются достаточно точно. При определении же упругого восстановления при этом могут быть погрешности из-за необходимости поднимать груз при разгрузке;

3) в связи с этим в данной работе предложен и реализован способ повторного нагружения восстановленной поверхности. При этом перемещения нагружения равны перемещениям упругого восстановления после первого нагружения.

3. *Диаграмма вдавливания и разгрузки шара является основным интегральным результатом процесса вдавливания.*

Выделены несколько характерных линий этой диаграммы:

1) прежде всего диаграмма нагрузки в координатах сила полное перемещение,  $Q - u_0$ , эта часть диаграммы аппроксимируется степенной функцией вида:

$$Q; cu_0^n, \quad (7.1)$$

где  $c, n$  – параметры аппроксимации, определяемые методом наименьших квадратов или приближенно по двум точкам;

2) производя нагрузку и разгрузку при разных значениях силы можно также построить линию разгрузки, как этап диаграммы вдавливания;

3) имея участок нагрузки и разгрузки можно получить точки зависимости Мартенса, линейной зависимости чисто пластических перемещений от нагрузки.

Диаграмма вдавливания шара является основной для построения традиционной диаграммы сжатия металла при условии, что известен способ определения напряжений через силы и деформаций через перемещения.

4. *Переход от диаграммы вдавливания шара к диаграмме сжатия стандартного образца:*

1) связь между максимальными контактными давлениями  $\sigma_0$  по площадке контакта и общей нагрузкой  $Q$  на шар установлена нами ранее вариационно-экспериментальным методом в работе [2]. В которой получена простая зависимость:

$$\sigma_0 = \sigma_{cp} n, \quad (7.2)$$

где  $\sigma_{cp} = HM$  – среднее контактное давление по площадке контакта;  $n$  – показатель степени в зависимости нагрузки  $Q_0$  от глубины вдавливания типа (7.1);

2) предложен и реализован приближенный переход от полных контактных перемещений  $u_0$  к деформациям контактирующей части поверхности и деформируемой зоны. Деформируемая часть металла принята в форме схематизированного кругового стержня, высота которого  $l$  равна толщине испытуемого образца; так, что принято, что:

$$\varepsilon = u_0 / l. \quad (7.3)$$

5. *Элементы теории пластического деформирования поверхности шаром:*

1) начальный этап упругого деформирования описывается формулами Герца. Из условия равенства давлений твердости в момент начала пластичности легко определяется нагрузка этого перехода;

2) безусловно, интересным является известный факт линейной зависимости полных пластических перемещений  $u_p$  от полной нагрузки  $Q$ , впервые замеченный еще Мартенсом и в дальнейшем подтвержденный экспериментами других исследователей;

3) построение диаграммы сжатия металла по диаграмме вдавливания шара позволило определить основные параметры схематизированной диаграммы сжатия:

- предел текучести металла  $\sigma_T^{те}$  при сжатии;

- модуль упрочнения металла  $E_T$  и параметр упрочнения  $\lambda_T$ ;

4) введено понятие полной пластической работы  $A_p$  при вдавливании шара и полной работы вдавливания шара  $A$ . Введена новая механическая характеристика: – коэффициент пластической работы при вдавливании шара как отношение работы пластической работы к полной работе вдавливания;

$$\lambda_p = A_p / A. \quad (7.4)$$

Это очень удобный простой параметр описания пластических свойств; этот коэффициент эквивалентный коэффициенту диссипации энергии при пластических деформациях;

5) имеется некоторая корреляция между коэффициентом пластической работы и пластическим коэффициентом сжатия, как отношение пластических контактных перемещений  $u_p$  к полным  $u_0$ :

$$k_p = u_p / u_0; \quad (7.5)$$

б) получена зависимость для определения силы упругого вдавливания  $Q_E$  на последнем этапе деформирования плоскости шаром.

*б. На основе выполненных исследований предложен порядок определения новых механических характеристик металла по диаграмме вдавливания шара в плоскость.*

Таковыми характеристиками являются:

- 1)  $\lambda_p$  - коэффициент пластической работы при вдавливании шара;
- 2)  $\sigma_T^{не}$  - предел текучести металла при сжатии, определяемый при вдавливании шара;
- 3)  $E_T$  - модуль упрочнения металла, определяемый по вдавливанию шара;
- 4)  $\lambda_T$  - параметр упрочнения, определяемый по вдавливанию шара;
- 5)  $n, c$  - параметры диаграммы вдавливания шара.

*7. Определение новых механических характеристик металла, по вдавливанию шара, выполнено по данным, приведенным в книге С.С. Дрозда [3]:*

1) характеристики получены для следующих сплавов: армо-железа; сталь 10; сталь 35; сталь 45; сталь 10ХГСА; магниевый сплав МА-2; дуралюмин Д1; титановый сплав ВТЗ-1;

2) сравнение разных значений новых механических характеристик для разных сплавов указывает на полное соответствие их физическому смыслу: так коэффициент пластической работы  $\lambda_p$  растет с уменьшением твердости сплава и т.д.;

3) новые механические характеристики могут использоваться при построении энергетических моделей процессов деформирования, разрушения и износа металлов.

*8. Перспективы дальнейших исследований.*

Полученные в данной работе результаты исследований позволяют наметить и в дальнейшем реализовать следующие направления работ:

1) разработка моделей процессов накопления повреждений статистических и циклических нагружениях при этом предложенный в данной работе способ определения коэффициента пластической работы может быть использован для определения допустимой величины пластической работы в дифференциальных системах;

2) предложенный в работе подход к исследованию процессов вдавливания индентора при определении твердости может быть применен при исследовании аналогичных процессов при определении твердости по Роквеллу; по Виккерсу; при определении микротвердости; при анализе результатов, полученных на нанотвердомерах;

3) здесь в работе изучались закономерности вдавливания шара по нормали; в процессах трения и изнашивания необходимо изучение закономерностей пластического деформирования поверхности при тангенциальном или касательном движении индентора, в частности, шара, а также клина и конуса;

4) в процессе выполнения исследований стала очевидной необходимость уточнения результатов на каждом этапе исследований: а) в частности необходимо достаточно точное решение задачи об асимметричном пластическом вдавливании шара в плоскость; в) есть необходимость также в более точном решении пластической контактной задачи о сдвиге шара вдавленного в плоскость; с) необходимо также решение задачи о пластическом качении шара по поверхности;

5) одним из важных направлений исследования процессов разрушения и износа является исследование динамических диссипативных моделей этих процессов; при построении диссипативных моделей процессов в металлах решающую роль играют методы определения работы пластической деформации;

б) работа с известным оборудованием типа пресс Бринелля с измерением контактных перемещений шара показала, что точность этих измерений недостаточно высока: требуется конструирование и создание специальных устройств для замера этих перемещений, в частности необходима автоматизация и компьютеризация этих измерений.

*9. В завершение итоговых размышлений еще раз подчеркнем, что метод индентирования поверхности с целью изучения характеристик механических свойств ввиду его исключительности требует детального, теоретически строго исследования с последующим совершенствованием оборудования и техники эксперимента.*

Пользуясь случаем, автор предлагает специалистам, связанным с исследованием и использованием механических свойств поверхности, принять активное участие в выполнении работ по намеченным направлениям исследований.

## Литература

1. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочное по сопротивлению материалов. – К.: Наукова думка, 1988. – 736 с.
2. Кузьменко А.Г. Пластический контакт, вариационно-экспериментальный метод. – Хмельницкий: ХНУ, 2009. – 359 с.
3. Дрозд М.С. Инженерные расчеты упруго-пластической контактной деформации. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

Надійшла 21.12.2010