



«Новые методы определения твёрдости материалов»

Лекция 27

Lec_27_metod_opr_tverd_3MC_LNA_01_12_2015

Теоретические исследования характера изменения размерного эффекта в зависимости от формы индентора и способа определения твердости

**Профессор Мощенок В.И.
Доцент Лалазарова Н.А.**

Содержание

★ 27.1. Теоретические исследования характера изменения размерного эффекта при определении твердости пирамидальными инденторами

★ 27.1.1. Определение твёрдости по Виккерсу и Берковичу

★ 27.1.2. Определение твёрдости по Мейеру пирамидальным индентором

★ 27.1.3. Определение объёмной твёрдости пирамидальным индентором

★ 27.2. Теоретические исследования характера изменения размерного эффекта при определении твердости сферопирамидальным и сфероконическим инденторами

★ Список литературы к лекции 27

★ Контрольные вопросы

★ Задания для самостоятельной работы



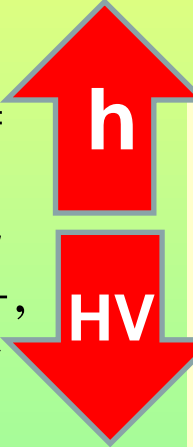
27.1. Теоретические исследования характера изменения размерного эффекта при определении твердости пирамидальными инденторами

27.1.1. Определение твёрдости по Виккерсу и Берковичу

Формула для определения твердости по Виккерсу с учетом уравнения $F=ah^2+bh$ будет иметь следующий вид

$$HV = \frac{F}{S_{\text{пир}}} = \frac{ah^2 + bh}{26,428h^2} = \frac{h(ah + b)}{26,428h^2} = \frac{ah + b}{26,428h} = \frac{a}{26,428} + \frac{b}{26,428h} = c + \frac{d}{h},$$

(27.1)



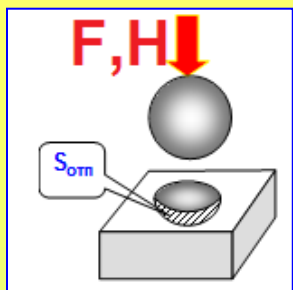
$c = \frac{a}{26,428}$ - Н/мм²;

$d = \frac{b}{26,428}$ - Н/мм - константы,

где $S_{\text{пир}}$ - площадь боковой поверхности внедренной части пирамиды, мм²;

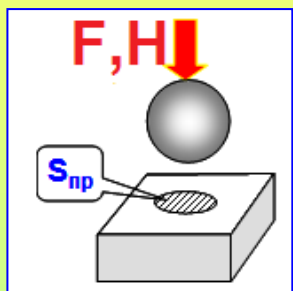
зависящие от формы применяемого индентора и свойств материала; h - глубина внедрения индентора, мм.

Размерный эффект (ISE)



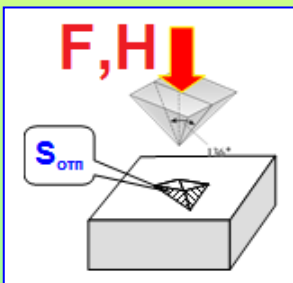
твёрдость по Бринеллю для индентора-шарика

$$HB = \frac{ah^2 + bh}{2\pi Rh} = \frac{h(ah + b)}{2\pi Rh} = \frac{ah + b}{2\pi R} = \frac{ah}{2\pi R} + \frac{b}{2\pi R} = ch + d$$



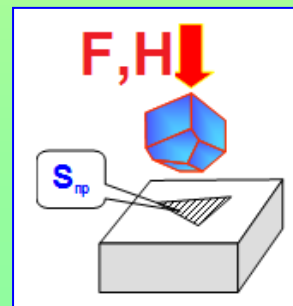
твёрдость по Мейеру для индентора-шарика

$$HM = \frac{P}{S_{пр}} = \frac{h(ah + b)}{\pi h(2R - h)} = \frac{ah + b}{\pi(D - h)}$$



твёрдость по Виккерсу для индентора-пирамиды Виккерса

$$HV = \frac{P}{S_{нуп}} = \frac{ah^2 + bh}{26,428h^2} = \frac{h(ah + b)}{26,428h^2} = \frac{ah + b}{26,428h} = \frac{a}{26,428} + \frac{b}{26,428h} = c + \frac{d}{h}$$



твёрдость по Мейеру для индентора-пирамиды Берковича

$$HM_{\text{mod}}^{B65,27} = \frac{P}{S_{пр.нуп}^{65,27}} = \frac{ah^2 + bh}{24,494h^2} = \frac{a}{24,494} + \frac{b}{24,494h}$$

Определение твёрдости по Виккерсу и Берковичу

Как следует из формулы (27.1) с увеличением глубины внедрения пирамиды Виккерса значения чисел твердости по Виккерсу всегда будут уменьшаться.

Аналогично получаем формулы для расчета твердости по Берковичу с использованием в качестве индентора обычной ($\alpha=65,03^\circ$) и модифицированной ($\alpha=65,27^\circ$) трехгранных пирамид

$$НБ^{65,03} = \frac{a}{23,962} + \frac{b}{23,962h} = c_1 + \frac{d_1}{h}, \quad (27.2)$$



h



НБ

где $c_1 = \frac{a}{23,962}$ - Н/мм²;

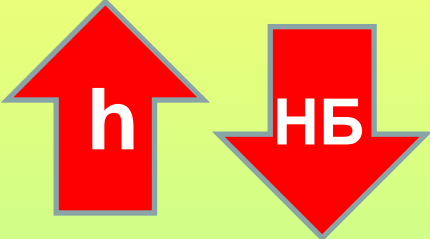
$d_1 = \frac{b}{23,962}$ Н/мм - константы, зависящие от формы применяемого

индентора и свойств материала; h – глубина внедрения индентора, мм.

Формулы (27.1) и (27.2) убедительно свидетельствуют, что с увеличением глубины внедрения индентора значения чисел твердости по Берковичу, также как и по Виккерсу, всегда уменьшаются.

27.1.2. Определение твёрдости по Мейеру пирамидальным индентором

С использованием уравнения $F=ah^2+bh$ формула для определения твердости по Мейеру с применением в качестве индентора пирамиды Виккерса, будет иметь следующий вид

$$HM = \frac{F}{S_{\text{пр.пир.}}} = \frac{ah^2 + bh}{24,5h^2} = \frac{a}{24,5} + \frac{b}{24h}, \quad (27.3)$$


где F – нагрузка, Н; $S_{\text{пр.пир.}}$ – площадь проекции пирамидального отпечатка, мм²; h – глубина внедрения индентора, мм; a , Н/мм² и b , Н/мм – константы, зависящие от формы индентора и свойств материала.

Из формулы (27.3) следует, что твердость по Мейеру с использованием в качестве индентора пирамиды Виккерса **с увеличением глубины внедрения (нагрузки) уменьшается.**

Определение твёрдости по Мейеру пирамидальным индентором

Для пирамиды Берковича обычной ($\alpha=65,03^\circ$) и модифицированной ($\alpha=65,27^\circ$) твердость по Мейеру будет иметь вид

$$HM^{Б65,03} = \frac{F}{S_{\text{пр.пир}}^{65,03}} = \frac{ah^2 + bh}{23,962h^2} = \frac{a}{23,962} + \frac{b}{23,962h} \quad (27.4)$$

$$HM_{\text{мод}}^{Б65,27} = \frac{F}{S_{\text{пр.пир}}^{65,27}} = \frac{ah^2 + bh}{24,494h^2} = \frac{a}{24,494} + \frac{b}{24,494h} \quad (27.5)$$

где $S_{\text{пр.пир}}^{65,03}$ и $S_{\text{пр.пир}}^{65,27}$ – площади проекций пирамид с углом $65,03^\circ$ и $65,27^\circ$ соответственно, мм^2 ; F – нагрузка на индентор, Н; h – глубина внедрения индентора, мм; a и b – константы, зависящие от формы индентора и свойств материала.

Анализ формул и показывает, что с увеличением глубины внедрения индентора и в случае применения пирамид Берковича твердость по Мейеру уменьшается.

Определение объёмной твёрдости пирамидальным индентором

Для пирамиды Берковича обычной ($\alpha=65,03^\circ$) и модифицированной ($\alpha=65,27^\circ$) твердость по Мейеру будет иметь вид

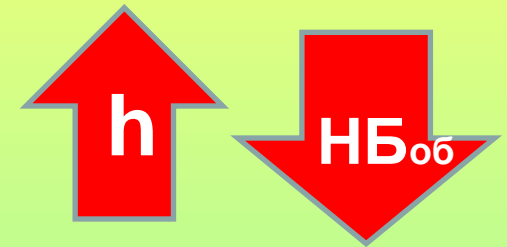
$$HV_{об}^{136} = \frac{F}{V_{инд}} = \frac{ah^2 + bh}{8,168h^3} = \frac{a}{8,168h} + \frac{b}{8,168h^2}, \quad (27.6)$$

где $HV_{об}^{инд}$ – объемная твердость, определяемая пирамидой Виккерса по методу невозстановленного отпечатка, Н/мм³; F – нагрузка на индентор, Н; $V_{инд}$ – объем внедренной в материал части индентора, мм³, h – глубина внедрения индентора в исследуемый материал, мм; a , Н/мм² и b , Н/мм – константы, зависящие от формы индентора и свойств материала.

Определение объёмной твёрдости пирамидальным индентором

Аналогичную формулу получаем и для модифицированной пирамиды Берковича

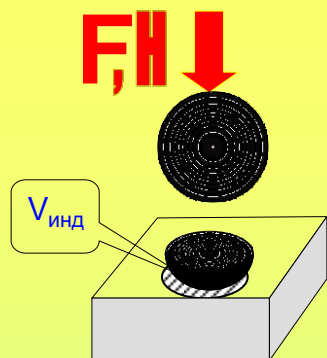
$$H_{об}^{65,27} = \frac{F}{V_{инд}} = \frac{ah^2 + bh}{8,165h^3} = \frac{a}{8,165h} + \frac{b}{8,165h^2} \quad (27.7)$$



Формулы (27.6) и (27.7) наглядно свидетельствуют, что при увеличении глубины внедрения пирамид Виккерса или Берковича (и соответственно, нагрузки) значения чисел объёмной твёрдости всегда будут уменьшаться.

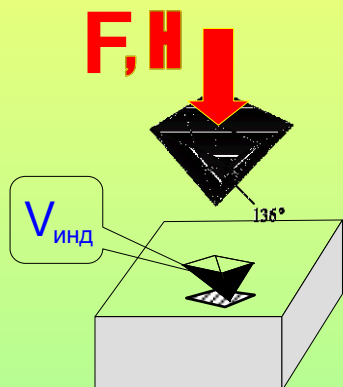
Размерный эффект (ISE)

объемная твердость для индентора-шарика



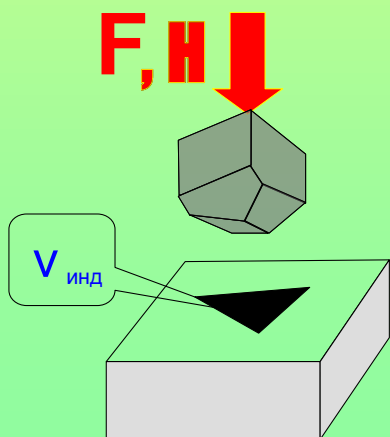
$$HB_{об}^{инд} = \frac{F}{V_{инд}} = \frac{ah^2 + bh}{1,047 \cdot h^2(3R - h)} = \frac{ah + b}{h(3,141R - 1,047h)} = \frac{a}{3,141R - 1,047h} + \frac{b}{h(3,141R - 1,047h)}$$

объемная твердость для пирамиды Виккерса



$$HV_{об}^{инд} = \frac{F}{V_{инд}} = \frac{ah^2 + bh}{8,168h^3} = \frac{a}{8,168h} + \frac{b}{8,168h^2}$$

объемная твердость для пирамиды Берковича



$$HB_{об}^{65,27} = \frac{F}{V_{инд}} = \frac{ah^2 + bh}{8,165h^3} = \frac{a}{8,165h} + \frac{b}{8,165h^2}$$

27.2. Теоретические исследования характера изменения размерного эффекта при определении твердости сферопирамидальным и сфероконическим инденторами

Для сферопирамидальных и сфероконических инденторов размерный эффект проявляется следующим образом: при внедрении сферической части индентора до определенной глубины, определяемой уравнением

$$h_{\text{сф}} = R - R \cos\left(90^\circ - \frac{\alpha}{2}\right) = R\left(1 - \cos\left(90^\circ - \frac{\alpha}{2}\right)\right) \quad (27.8)$$

поверхностная твердость увеличивается согласно формуле

$$HB = \frac{ah^2 + bh}{2\pi Rh} = \frac{h(ah + b)}{2\pi Rh} = \frac{ah + b}{2\pi R} = \frac{ah}{2\pi R} + \frac{b}{2\pi R} = ch + d$$


а объемная твердость уменьшается по формуле


$$HB_{\text{об}}^{\text{инд}} = \frac{F}{V_{\text{инд}}} = \frac{ah^2 + bh}{1,047h^2(3R - h)} = \frac{ah + b}{h(3,141R - 1,047h)} = \\ = \frac{a}{3,141R - 1,047h} + \frac{b}{h(3,141R - 1,047h)},$$

Дальнейшее увеличение глубины внедрения индентора включает в работу дополнительно пирамидальную или коническую часть индентора, и в этом случае поверхностная и объемная твердость уменьшаются.

Теоретические исследования характера изменения размерного эффекта при определении твердости сферопирамидальным и сфероконическим инденторами

На основании вышеизложенного можно сделать следующие теоретические выводы: при использовании в качестве индентора шарика, твердость по Бринеллю, Мейеру, поверхностная твердость с увеличением глубины внедрения индентора (нагрузки) должна **увеличиваться**

$$HB = \frac{ah^2 + bh}{2\pi Rh} = \frac{h(ah + b)}{2\pi Rh} = \frac{ah + b}{2\pi R} = \frac{ah}{2\pi R} + \frac{b}{2\pi R} = ch + d$$


$$HM = \frac{F}{S_{\text{пр}}} = \frac{h(ah + b)}{\pi h(2R - h)} = \frac{ah + b}{\pi(D - h)},$$


Теоретические исследования характера изменения размерного эффекта при определении твёрдости сферопирамидальным и сфероконическим инденторами

и наоборот, при использовании в качестве индентора пирамид Виккерса, Берковича, твёрдость по Виккерсу, Мейеру, поверхностная твёрдость с увеличением глубины внедрения индентора (нагрузки) должна **уменьшаться**

$$HV = \frac{F}{S_{\text{пир}}} = \frac{ah^2 + bh}{26,428h^2} = \frac{h(ah + b)}{26,428h^2} =$$

$$= \frac{ah + b}{26,428h} = \frac{a}{26,428} + \frac{b}{26,428h} = c + \frac{d}{h},$$

$$HB^{65,03} = \frac{a}{23,962} + \frac{b}{23,962h} = c_1 + \frac{d_1}{h},$$

$$HB_{\text{мод}}^{65,27} = \frac{a}{24,494} + \frac{b}{24,494h} = c_2 + \frac{d_2}{h}$$

$$HM = \frac{F}{S_{\text{пр.пир.}}} = \frac{ah^2 + bh}{24,h^2} = \frac{a}{24,5} + \frac{b}{24h},$$

$$HM^{Б65,03} = \frac{F}{S_{\text{пр.пир.}}^{65,03}} = \frac{ah^2 + bh}{23,962h^2} = \frac{a}{23,962} + \frac{b}{23,962h}$$

$$HM_{\text{мод}}^{Б65,27} = \frac{F}{S_{\text{пр.пир.}}^{65,27}} = \frac{ah^2 + bh}{24,494h^2} = \frac{a}{24,494} + \frac{b}{24,494h}$$

Теоретические исследования характера изменения размерного эффекта при определении твердости сферопирамидальным и сфероконическим инденторами

Объемная же твердость при индентировании шариком, пирамидами Виккерса и Берковича с увеличением нагрузки всегда должна уменьшаться

$$HB_{об}^{инд} = \frac{F}{V_{инд}} = \frac{ah^2 + bh}{1,047h^2(3R - h)} = \frac{ah + b}{h(3,141R - 1,047h)} = \frac{a}{3,141R - 1,047h} + \frac{b}{h(3,141R - 1,047h)},$$



$$HB_{об}^{65,27} = \frac{F}{V_{инд}} = \frac{ah^2 + bh}{8,165h^3} = \frac{a}{8,165h} + \frac{b}{8,165h^2}$$



$$HV_{об}^{136} = \frac{F}{V_{инд}} = \frac{ah^2 + bh}{8,168h^3} = \frac{a}{8,168h} + \frac{b}{8,168h^2},$$



Чтобы проверить правильность данных выводов необходимо сопоставить полученные теоретические исследования с экспериментальными данными при определении твердости материалов инденторами различной геометрической формы.

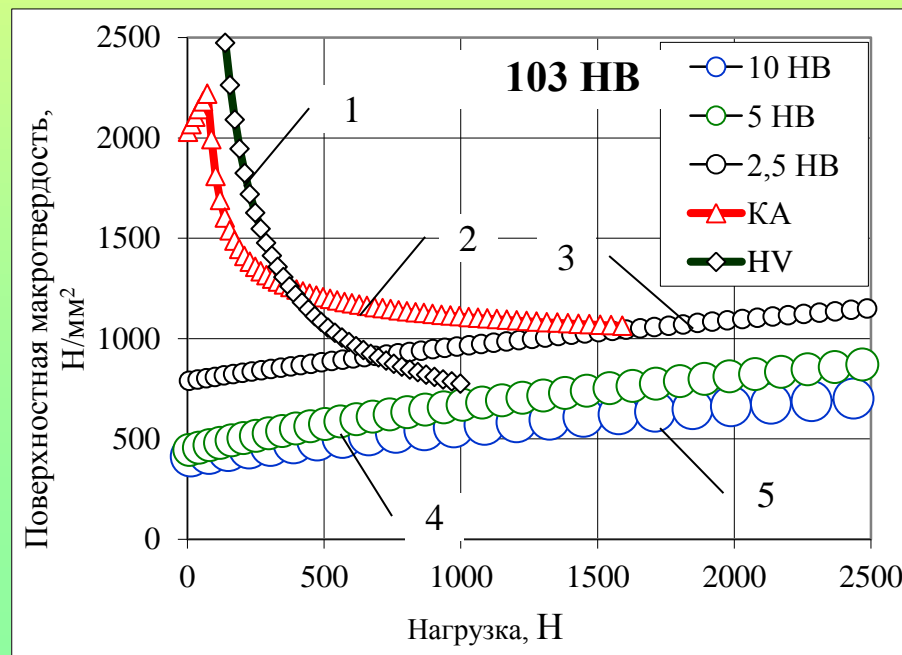
27.3. Экспериментальное подтверждение теоретических исследований характера изменения размерного эффекта при определении твердости материалов инденторами различной геометрической формы

Полученные теоретические зависимости характера изменения твердости в зависимости от глубины внедрения индентора (или нагрузки) были сопоставлены с экспериментальными результатами, полученными при вдавливании инденторов различной геометрической формы в сталь низкой (≈ 100 НВ), средней (≈ 200 НВ) и высокой твердости (≈ 400 НВ).

Как убедительно следует из экспериментальных результатов, представленных на рис., значения поверхностной твердости, при использовании в качестве инденторов шариков различного диаметра, с увеличением глубины внедрения индентора (или нагрузки) плавно увеличиваются, что в англоязычной терминологии соответствует понятию «reverse indentation size effect».

27.3. Экспериментальное подтверждение теоретических исследований характера изменения размерного эффекта при определении твердости материалами инденторами различной геометрической формы

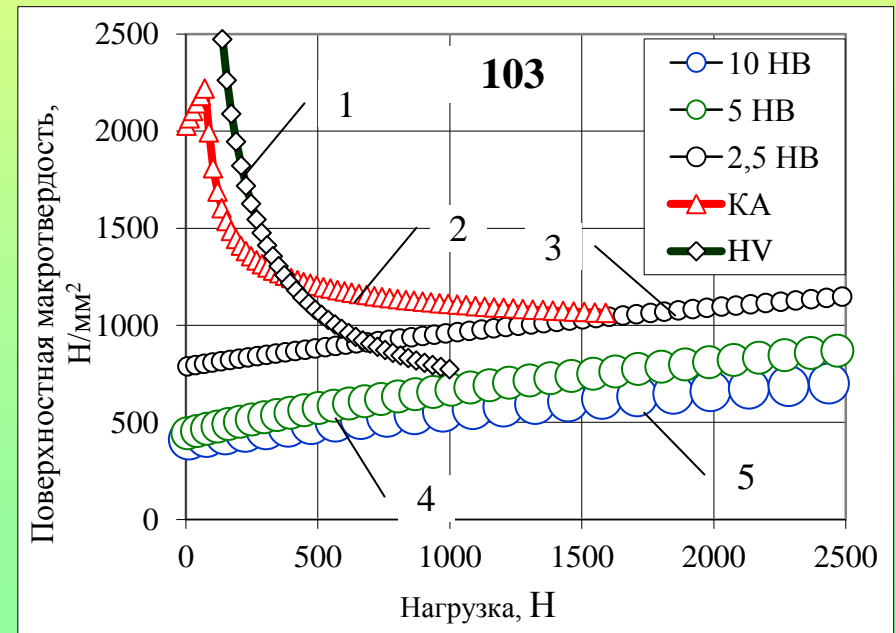
Как следует из результатов экспериментов, представленных на рис., значения поверхностной твердости, при использовании в качестве инденторов шариков различного диаметра, с увеличением глубины внедрения индентора (или нагрузки) плавно увеличиваются, что в англоязычной терминологии соответствует понятию **«reverse indentation size effect»**.



Экспериментальное подтверждение теоретических исследований характера изменения размерного эффекта при определении твердости материалов инденторами различной геометрической формы

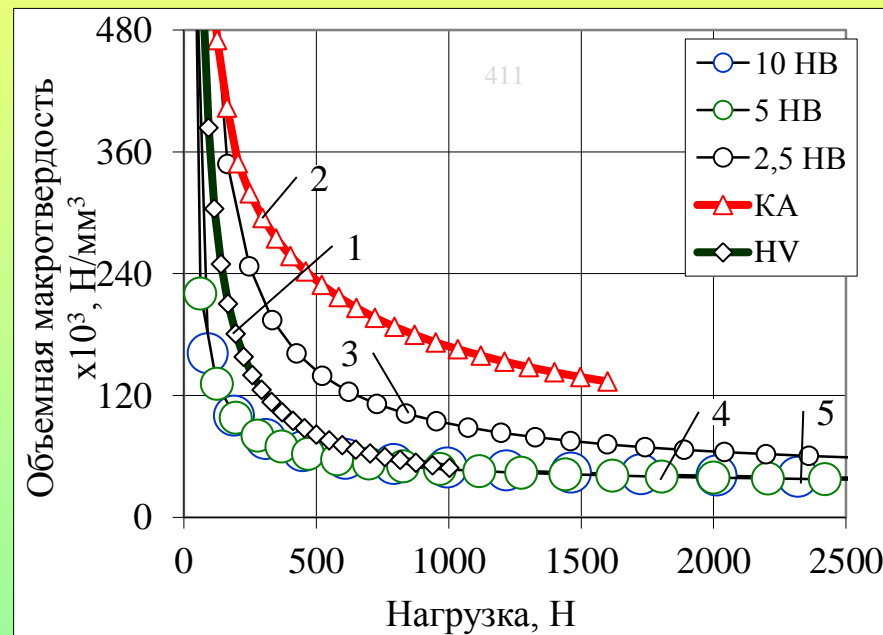
Использование в качестве индентора пирамиды Виккерса приводит к обратному характеру изменения поверхностной твердости от нагрузки: с увеличением глубины внедрения индентора значения твердости уменьшаются (indentation size effect).

Поверхностная твердость, определяемая сфероконическим индентором, имеет компромиссный характер изменения твердости от нагрузки, т.е. сначала увеличивается (при вдавливании сферической части индентора), а затем уменьшается, когда в исследуемый материал внедряются и сферическая и коническая части индентора.



Экспериментальное подтверждение теоретических исследований характера изменения размерного эффекта при определении твердости материалов инденторами различной геометрической формы

Значения же объемной твердости, определяемой сферическими, сфероконическими, пирамидальными инденторами, всегда уменьшаются с увеличением глубины внедрения индентора или нагрузки.



Таким образом, полученные теоретические зависимости характера изменения размерного эффекта в зависимости от применяемого типа индентора убедительно подтверждены экспериментальными результатами.

Выводы

1) Показано, что точность описания вдавливания индентора эмпирическим степенным законом Мейера в значительной степени зависит от геометрии индентора и твердости материала. В целом ряде случаев при установлении зависимости между нагрузкой и глубиной внедрения индентора экспериментальные и расчетные данные совпадают только для некоторого диапазона глубин внедрения, а за его пределами наблюдаются существенные расхождения.

2) Установлено, что кривая нагружения диаграммы индентирования для инденторов разной геометрии и материалов разной твердости наиболее точно описывается уравнением $F = ah^2 + bh$, где F – нагрузка, Н; h – глубина внедрения индентора, мм; a и b – коэффициенты, зависящие от геометрии индентора и свойств материала.



Выводы

3) Использование предложенного уравнения в формуле для определения твердости позволяет получить функциональную зависимость твердости от глубины внедрения индентора, которая дает возможность оценить характер размерного эффекта, т.е. изменения твердости в зависимости от нагрузки.

4) Анализ полученных формул, описывающих зависимость F от h показал, что:

- при использовании сферического индентора (методы Бринелля и Мейера) должно происходить увеличение твердости с ростом нагрузки;
- при использовании пирамидальных инденторов (методы Виккерса, Берковича и Мейера) твердость должна уменьшаться с увеличением нагрузки;
- при использовании как сферических, так и пирамидальных инденторов при определении объемной твердости, последняя должна уменьшаться с увеличением нагрузки.



Список литературы к лекции 27

- 1) Мощенок В.И. Новые методы определения твердости материалов : монография / В.И. Мощенок. – 2-е изд. доп. и перераб. – Х. : ХНАДУ, 2013. – 324 с.
- 2) Федосов, С. А. Определение механических свойств материалов микроиндентированием. Современные зарубежные методики / С. А. Федосов, Л. Пешек . – М.: Физический факультет МГУ, 2004.- 100 с.
- 3) О'Нейль Г. Твердость металлов и ее измерение : пер. с англ. / Г. О'Нейль.– М-Л.: Metallurgizdat. – 1940. – 376 с.
- 4) Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора / С. И. Булычев, В. П. Алехин. - М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
- 5) W. Wolf. Infernu of mechanical properties from instrumented depth sensing indentation depths . / W. Wolf.// Crust. Res. Technol. – 2000. – 35. – P. 377-399.



Контрольные вопросы

1) От чего зависят постоянные n и d в формуле для определения твердости по Виккерсу с учётом уточнённого уравнения Мейера?

3. Каков характер изменения поверхностной твёрдости от нагрузки при использовании индентора-шарика?

4. Каков характер изменения поверхностной твёрдости от нагрузки при использовании индентора-шарика конуса? пирамиды Виккерса?



Задания для самостоятельной работы

1. Изучить по литературным источникам гипотезы, объясняющие влияние материала индентора на величину поверхностной твёрдости.





Кафедра технології металлов и матеріалознавства

Лалазарова Наталиа Алексеевна

E-mail: lalaz1991@mail.ru

г. Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ, КАФЕДРА ТМ и М

Tel.(8-057)707-37-92

