



«Методы определения твёрдости и прочности материалов»

Лекция 6

Lec_6_metod_opr_tverd_3MC_LNA_16_09_2015

Методики определения проекционной твердости.

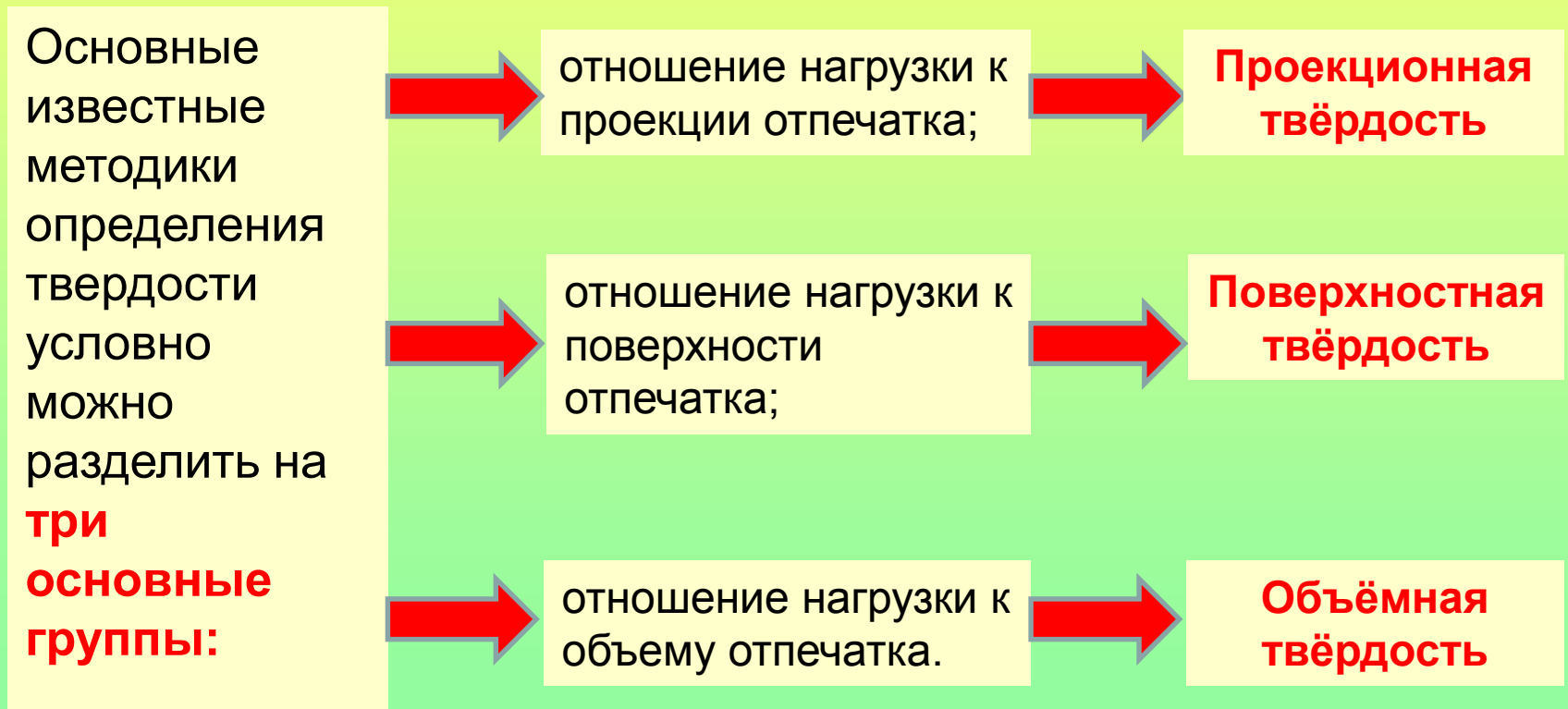
**Профессор Мощенок В.И.
Доцент Лалазарова Н.А.**

Содержание

- ✦ 6.1. Проекционная твёрдость
- ✦ 6.2. Определение проекционной твёрдости пирамидой Виккерса
- ✦ 6.3. Определение проекционной твёрдости сферическим индентором
- ✦ 6.4. Определение проекционной твёрдости сфероконическим индентором
- ✦ 6.5. Сравнение проекционной твердости, полученной вдавливанием пирамидальных, сферических и сфероконических инденторов
- ✦ Список литературы к лекции 6
- ✦ Контрольные вопросы
- ✦ Задания для самостоятельной работы

6.1. Проекционная твёрдость

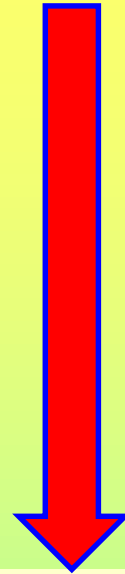
Многообразие методов определения твердости и отсутствие одного методологического подхода к ее оценке требуют разработки методик расчета на основе единых принципов, которые можно было бы использовать в макро-, микро-, нанодиапазонах испытаний и, возможно, и еще меньших по размеру диапазонах: пико-, фемто- и т.д.



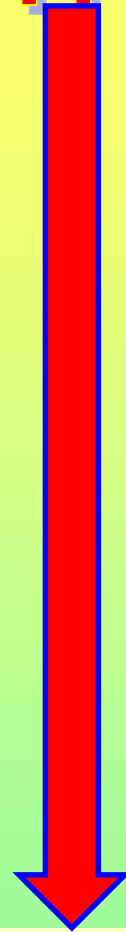
Методики определения твёрдости



**Проекционная
твёрдость**



**Поверхностная
твёрдость**

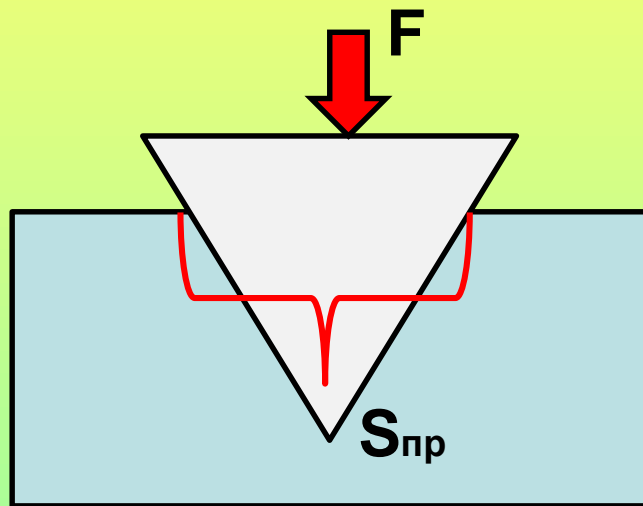


Объёмная твёрдость

Проекционная твёрдость

Под обобщающим термином «**проекционная твёрдость**» в первую очередь подразумевается широко известная **твёрдость по Мейеру**, которая представляет собой **отношение нагрузки к проекции отпечатка**.

Для метода **невосстановленного отпечатка проекционную твёрдость** следует рассматривать



как **отношение нагрузки F на индентор к площади проекции S внедренной в материал его части**.

Рассмотрим методику расчета проекционной твёрдости при использовании в качестве инденторов обычной и модифицированной пирамиды Берковича.

Проекционная твёрдость

В последнее время в методах определения твердости все чаще стали использовать вместо стандартной пирамиды Берковича ($\alpha=65,03^\circ$) модифицированную ($\alpha=65,27^\circ$). Такая замена вызвана желанием уравнивать площади проекции отпечатков, полученных этими пирамидами, с целью более корректного сравнения чисел твердости.

При использовании обычной ($\alpha=65,03^\circ$) или модифицированной ($\alpha=65,27^\circ$) пирамид Берковича площадь проекции сечения ее на максимальной глубине внедрения в образец можно записать как

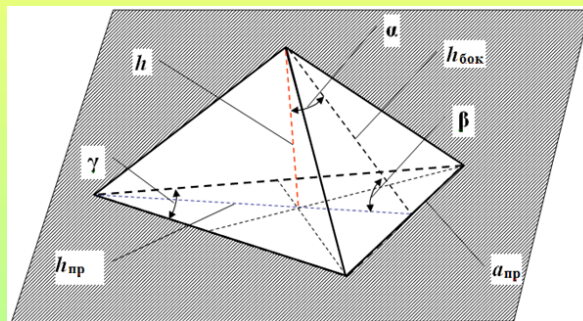


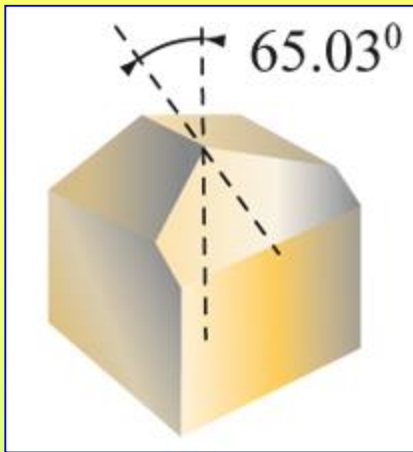
Схема к расчету площади проекции сечения пирамиды Берковича на основную плоскость

$$S_{\text{пр}} = \frac{1}{2} a_{\text{пр}} \cdot h_{\text{пр}} \quad (5.1)$$

где $a_{\text{пр}}$ – сторона проекции сечения пирамиды на основную плоскость;

$h_{\text{пр}}$ – высота проекции сечения пирамиды на основную плоскость.

Проекционная твёрдость



$$S_{\text{пр}} = \frac{1}{2} a_{\text{пр}} \cdot h_{\text{пр}}$$

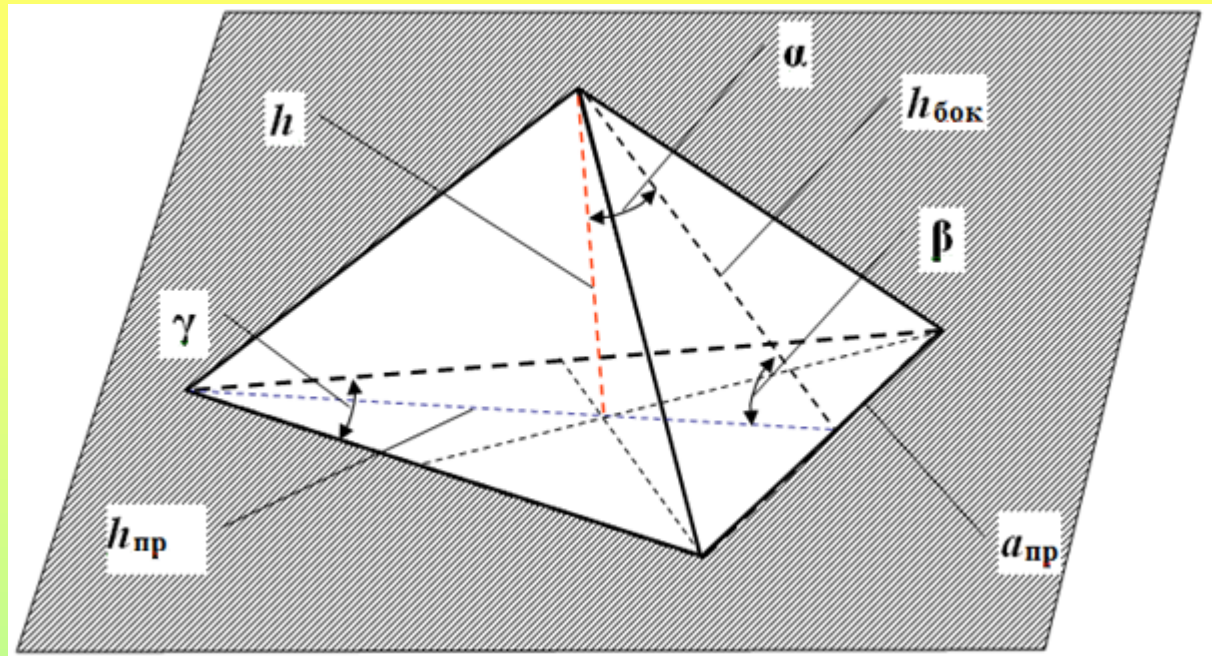


Схема к расчету площади проекции сечения пирамиды Берковича на основную плоскость: ω – основная плоскость; h – высота пирамиды Берковича; α – угол между высотой и апофемой пирамиды; β – угол между апофемой пирамиды и высотой основания; γ – угол между сторонами основания пирамиды; $h_{\text{бок}}$ – апофема пирамиды; $a_{\text{пр}}$ – сторона проекции сечения пирамиды на основную плоскость; $h_{\text{пр}}$ – высота проекции сечения пирамиды на основную плоскость

Проекционная твёрдость

Подставив выражения $a_{\text{пр}}$ и $h_{\text{пр}}$ в формулу (5.1), для обычной пирамиды Берковича ($\alpha=65,03^\circ$) получаем:

$$\begin{aligned} S_{\text{пр}} &= \frac{3h}{\text{tg}60^\circ \text{tg}(90^\circ - \alpha)} \cdot \frac{3h}{\text{tg}(90^\circ - \alpha)} = \\ &= \frac{9h^2}{\text{tg}60^\circ \text{tg}^2 24,97^\circ} = 23,962h^2. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Для модифицированной пирамиды Берковича ($\alpha=65,27^\circ$) аналогично имеем

$$S_{\text{пр}} = \frac{9h^2}{\text{tg}60^\circ \text{tg}^2 24,73^\circ} = 24,494h^2 \quad (5.3)$$

Проекционная твёрдость

Проекционная твёрдость (или твёрдость индентирования по ISO 14577) $H_{\text{пр}}$ с использованием **обычной ($\alpha=65,03^\circ$)** и **модифицированной ($\alpha=65,27^\circ$)** пирамид Берковича

$$H_{\text{пр}}^{65,03} = \frac{F_{\text{max}}}{23,962h^2} \quad (5.4) \quad H_{\text{пр}}^{65,27} = \frac{F_{\text{max}}}{24,494h^2} \quad (5.5)$$

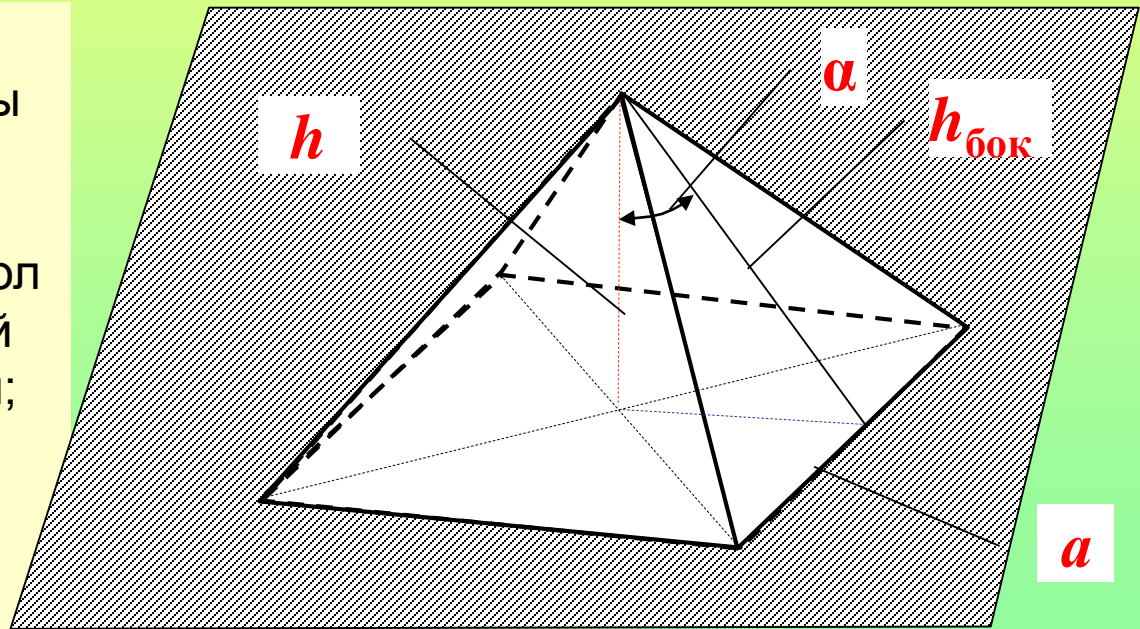
Формула (5.5) дает более близкие значения проекционной твёрдости, измеренной с помощью пирамид Виккерса и Берковича.

6.2. Определение проекционной твёрдости пирамидой Виккерса

Для **пирамиды Виккерса** с углом между апофемой боковой стороны пирамиды и высотой $\alpha=68^\circ$ имеем

$$S_{\text{пр}} = a^2 = \left(\frac{2h}{\text{tg}(90 - \alpha)^\circ} \right)^2 = \frac{4h^2}{\text{tg}^2 22^\circ} = \frac{4}{0,163} h^2 = 24,5h^2 \quad (5.6)$$

Схема к расчету площади проекции сечения пирамиды Виккерса на основную плоскость: h – высота пирамиды Берковича; α – угол между высотой и апофемой боковой стороны пирамиды; $h_{\text{бок}}$ – апофема боковой стороны пирамиды; a – сторона проекции сечения пирамиды на основную плоскость



Определение проекционной твёрдости пирамидой Виккерса

С учетом (5.6) **проекционная твердость**, измеряемой **пирамидой Виккерса** соответствует

$$HV_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{max}}}{24,5h^2} \quad (5.7)$$

Как следует из (5.3) и (5.7), геометрия модифицированной пирамиды Берковича подобрана таким образом, чтобы площадь проекции сечения ее любой плоскостью параллельной основной, давала примерно одинаковые величины как для пирамиды Берковича, так и для пирамиды Виккерса - $24,494h^2$ и $24,5h^2$ соответственно..

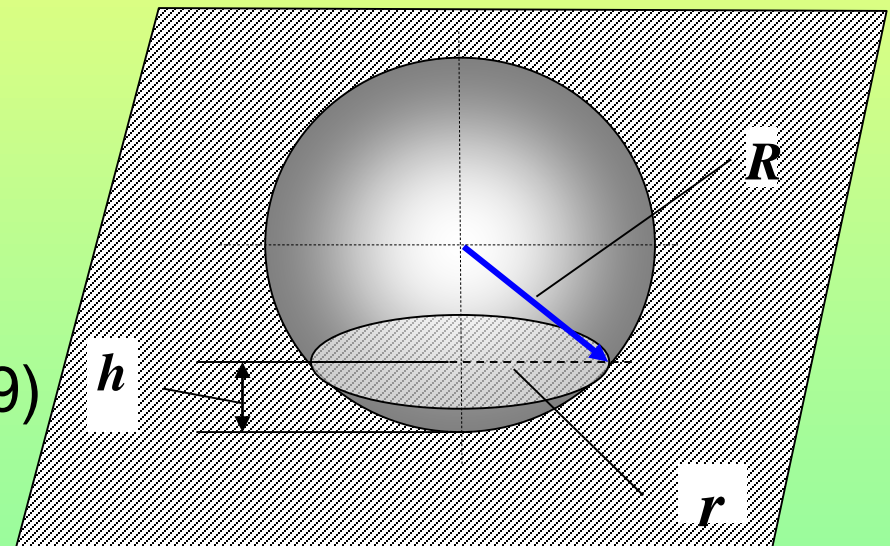
6.3. Определение проекционной твёрдости сферическим индентором

Для индентора в форме **шара** площадь проекции его сечения на основную плоскость будет равна

$$S_{\text{пр}} = \pi r^2 = \pi(R^2 - (R - h)^2) = \pi h(2R - h) \quad (5.8)$$

С учетом (5.8) **проекционная твёрдость** с использованием в качестве индентора **шара** будет равна

$$HB_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{max}}}{\pi h(2R - h)} \quad (5.9)$$



6.4. Определение проекционной твёрдости сфероконическим индентором

Для расчета проекционной твердости с использованием **сфероконического индентора** (т.е. конуса с закругленной вершиной в форме сферы) используют схему

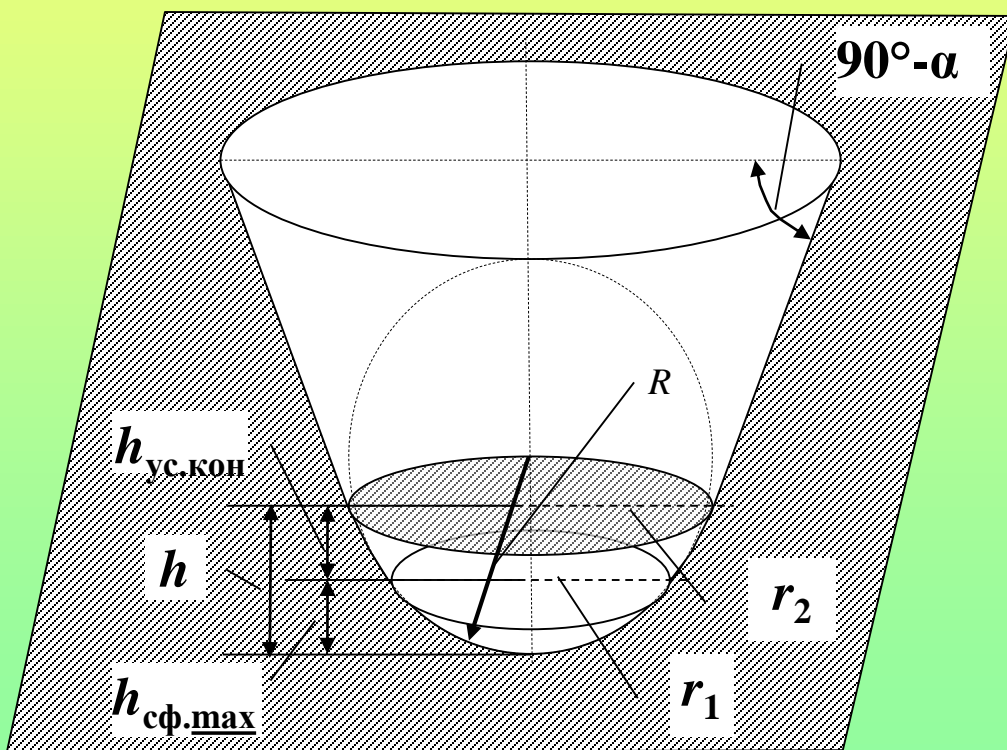


Схема к расчету площади проекции сечения сфероконического индентора на основную плоскость: h – глубина внедрения сфероконического индентора;

$h_{\text{сф.мах}}$ – максимальная глубина внедрения сферической части индентора;

$h_{\text{ус.кон}}$ – глубина внедрения конической части индентора;

r_1 – радиус проекции сечения сферической части индентора на основную плоскость;

r_2 – радиус проекции сечения конической части индентора на основную плоскость; α – половина угла между образующими усеченного конуса; R – радиус закругления вершины индентора

Определение проекционной твёрдости сфероконическим индентором

Общая глубина внедрения сфероконического индентора

$$h = h_{\text{сф.мах}} + h_{\text{ус.кон}} \quad (5.10)$$

Площадь проекции сечения внедренной части сфероконического индентора на основную плоскость будет равна

$$S_{\text{пр}} = \pi \left(\sqrt{h_{\text{сф.мах}} (2R - h_{\text{сф.мах}})} + \frac{h_{\text{ус.кон}}}{\text{tg}\alpha} \right)^2 \quad (5.11)$$

Проекционная твердость для сфероконического индентора с учетом (5.11) равна

$$H_{\text{пр}}^{\text{сф-кон}} = \frac{F_{\text{мах}}}{\pi \left(\sqrt{h_{\text{сф.мах}} (2R - h_{\text{сф.мах}})} + \frac{h_{\text{ус.кон}}}{\text{tg}\alpha} \right)^2} \quad (5.12)$$

Определение проекционной твёрдости сфероконическим индентором

Для определения **твёрдости индентирования** необходимо в формулы вместо глубины внедрения индентора в исследуемый материал h подставлять глубину контакта индентора с материалом h_K , которая определяется расчетно-графическим методом по методике Оливера и Фарра

$$h_K = h_{\max} - \varepsilon(h_{\max} - h_{\text{кас}}) \quad (5.13)$$

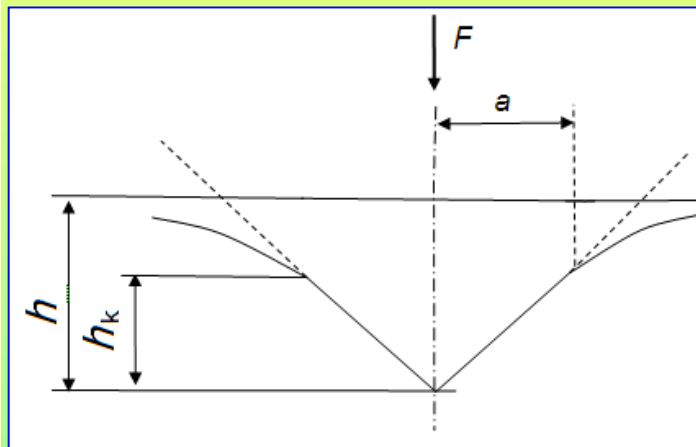
где h_K – глубина контакта индентора с исследуемым материалом;
 ε – коэффициент, зависящий от формы индентора ($\varepsilon=0,75$ для пирамид Берковича, Виккерса, сферы; $\varepsilon=0,73$ для конического индентора);

$h_{\text{кас}}$ – глубина, полученная как точка пересечения касательной к начальному этапу кривой разгрузки и осью глубины внедрения на диаграмме индентирования.

6.5. Сравнение проекционной твердости, полученной вдавливанием пирамидальных, сферических и сфероконических инденторов

Разработанные формулы для расчета проекционной твердости инденторами различной формы базируются на параметре – глубине внедрения индентора от поверхности материала h ,

а по ISO 14577 используется несколько меньший по размеру параметр – глубина контакта индентора с материалом h_k .



Глубину внедрения индентора получают на приборе методом прямых измерений.

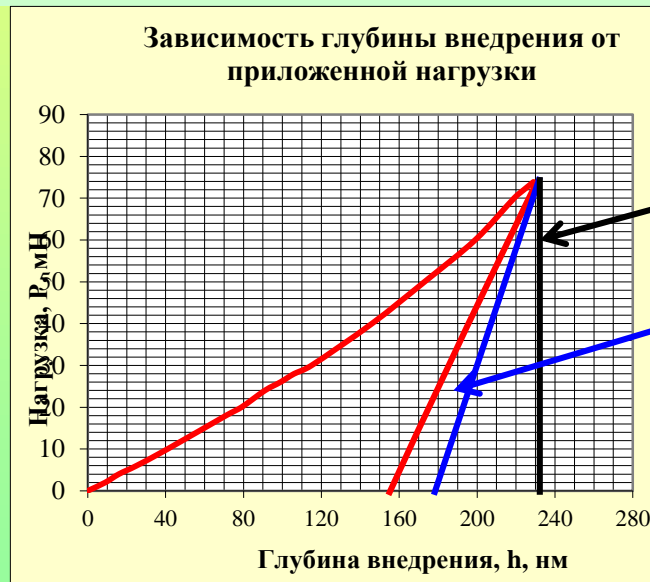
Глубину контакта индентора с материалом получают лишь с применением сложного графоаналитического метода с определенными допущениями.

Сравнение проекционной твердости, полученной вдавливанием пирамидальных, сферических и сфероконических инденторов

При определении твердости по ISO 14577 **пирамидой Берковича** необходимо к разгрузочной ветви диаграммы индентирования провести касательную линию и по точке пересечения этой линии с осью глубины внедрения индентора определить $h_{кас}$, затем определяют h_K и рассчитывают твёрдость индентирования.

Твердость индентирования по ISO 14577 равна

$$H_{IT}^{ISO} = \frac{F_{max}}{24,5h_K^2}$$



Твердость индентирования согласно методике ХНАДУ

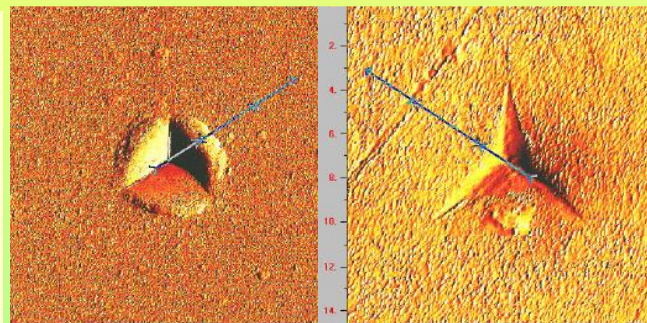
$$H_{IT}^{ХНАДУ} = \frac{F_{max}}{24,494h_{max}^2}$$

$$h_K = h_{max} - \varepsilon(h_{max} - h_{кас})$$

Сравнение проекционной твердости, полученной вдавливанием пирамидальных, сферических и сфероконических инденторов

Зачастую определение величины контакта индентора с материалом становится весьма затруднительным вследствие наличия на отпечатках навалов или прогибов.

Навалы и прогибы совершенно неодинаковы с каждой стороны отпечатка, даже встречаются случаи, когда с одной стороны индентора присутствует навал, а с другой – прогиб.



Отпечатки, полученные пирамидой Берковича: а – наличие навала; б – наличие прогиба

Другим важным недостатком индентирования по ISO 14577 является возможность определять твердость только в одной точке при максимальной нагрузке, в то время как по методике ХНАДУ ее можно

определять во всех точках кривой нагружения. Это значительно расширяет возможности предложенного нами метода и позволяет учитывать размерный эффект при определении твердости.

Сравнение проекционной твердости, полученной вдавливанием пирамидальных, сферических и сфероконических инденторов

При вдавливании **сфероконического индентора** в соответствии с **ISO 14577** получаем

$$H_{IT}^{ISO} = \frac{F_{\max}}{\pi \left(\sqrt{h_k (2R - h_{\text{сф. max}})} + \frac{h_{\text{ус. кон}}}{\text{tg} \alpha} \right)^2}$$

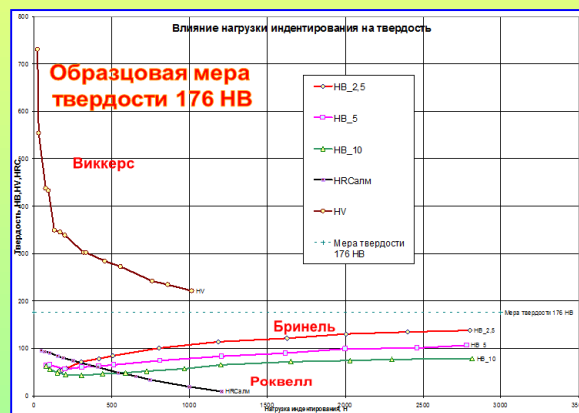
По методике **ХНАДУ** твердость будет равна

$$H_{IT}^{\text{ХНАДУ}} = \frac{F_{\max}}{\pi \left(\sqrt{h_{\text{сф. max}} (2R - h_{\text{сф. max}})} + \frac{h_{\text{ус. кон}}}{\text{tg} \alpha} \right)^2}$$

Сравнение проекционной твердости, полученной вдавливанием пирамидальных, сферических и сфероконических инденторов

При измерении твердости одного и того же материала, но разными инденторами и при разных нагрузках получают значения, различающиеся в несколько раз.

Твердость индентирования, вычисленная по ISO 14577 и методике ХНАДУ, различается всего на 5–17 %,



при этом во втором случае значительно упрощаются процедура проведения испытаний и обработка результатов экспериментов.

Новая методика позволяет определять твёрдость во всех точках кривой нагружения. Это значительно расширяет возможности предложенного метода и позволяет учитывать размерный эффект при определении твердости.

Сравнение данных определения твердости индентирования для образцовой меры твердости 103 НВ

Метод определения твердости	Тип применяемого индентора	Максимальная нагрузка, F_{max} , мН	Максимальная глубина внедрения индентора, h_{max} , нм	Твердость индентирования H_{IT} , ГПа	% по сравнению с ISO 14577
ISO 14577	пирамида Берковича, $\alpha=65,27^\circ$	189,71	1536,4	3,67	100
ХНАДУ				3,28	89
ISO 14577	шарик, $R=8600$ нм	189,71	1064,7	3,71	100
ХНАДУ				3,51	95
ISO 14577	конус с радиусом $R=8600$ нм при вершине и $\alpha=45^\circ$	15110	56063,4	0,87	100
ХНАДУ				0,71	83

Список литературы к лекции 6

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) ISO 14577-1:2002. Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters — Part 1: Test method



Контрольные вопросы

1. В чём сущность проекционной твёрдости?

2. Как определяют проекционную твёрдость пирамидой Виккерса по методике ISO и ХНАДУ?

3. Как определяют проекционную твёрдость сферическим индентором по методике ISO и ХНАДУ?

4. Как определяют проекционную твёрдость сфероконическим индентором по методике ISO и ХНАДУ?

5. В чём недостатки методики определения проекционной твёрдости по методике ISO?

Задания для самостоятельной работы

1. Вывести формулу проекционной твёрдости для пирамиды Виккерса.

2. Вывести формулу поверхностной твёрдости для пирамиды Берковича.

3. Вывести формулу объёмной твёрдости для пирамиды Берковича.



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

