



# **«Методы определения твёрдости и прочности материалов»**

## **Лекция 7**

Lec\_7\_metod\_opr\_tverd\_3MC\_LNA\_22\_09\_2015

**Методики определения  
поверхностной твердости.**

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

# Содержание



7.1. Поверхностная твёрдость



7.2. Определение поверхностной твёрдости пирамидой Виккерса



7.3. Определение поверхностной твёрдости пирамидой Берковича



7.4. Определение поверхностной твёрдости сферическим индентором



7.5. Определение поверхностной твёрдости сфероконическим индентором



7.6. Определение поверхностной твердости сфероконическим индентором для наноизмерений



7.7. Определение поверхностной твёрдости индентором Шора



Список литературы к лекции 7



Контрольные вопросы



Задания для самостоятельной работы

## 7.1. Поверхностная твёрдость

Стандартом DIN 50359 еще в 1997 г. был введен термин универсальная твёрдость. Затем другим, уже международным стандартом термин «универсальная твердость» был заменен на термин «твердость по Мартенсу».

Такая непоследовательность с названиями методов определения твердости вносит определенную путаницу, поскольку эти названия характеризуют не суть метода, а условные обозначения.

### Поверхностная твёрдость

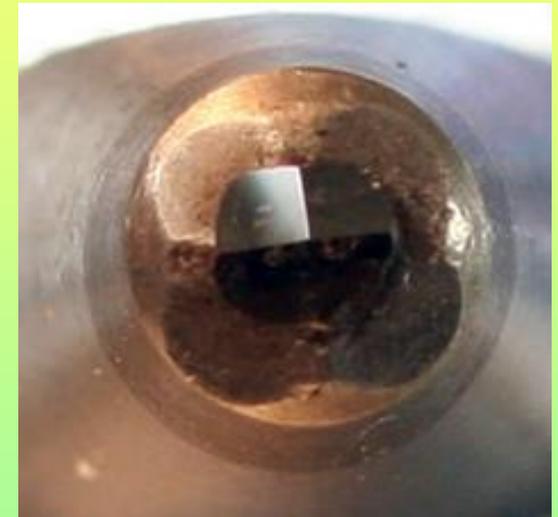
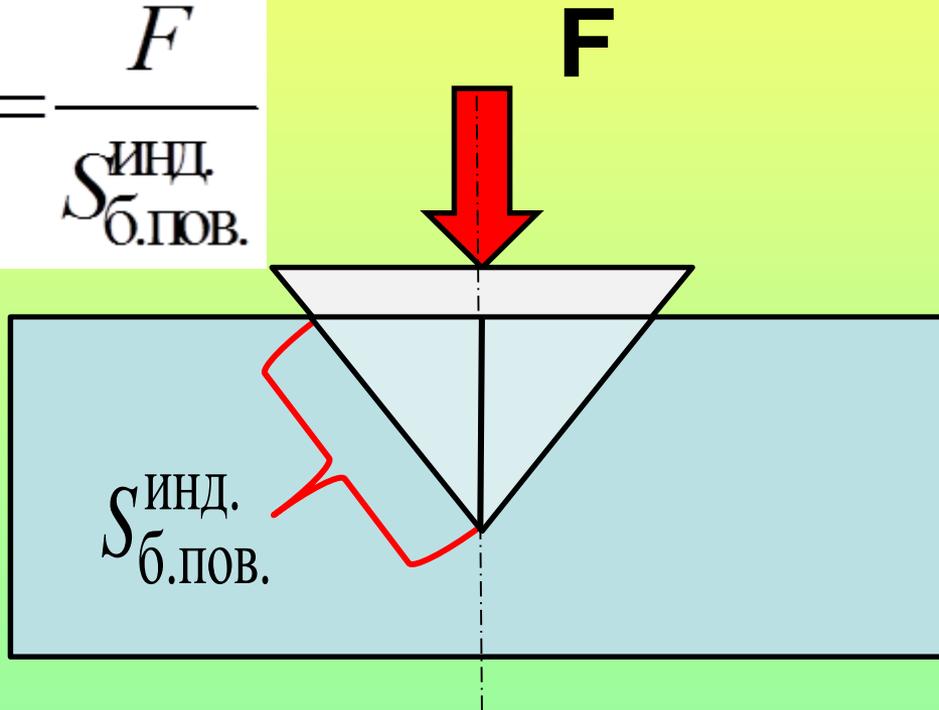
Было предложено объединить эти названия одним - **поверхностная твёрдость**.

Для метода восстановленного отпечатка поверхностная твёрдость вычисляется как отношение нагрузки к площади боковой поверхности отпечатка. Для метода невосстановленного отпечатка или **кинетической твердости** определение поверхностной твердости – это отношение нагрузки на индентор к площади боковой поверхности внедренной в материал его части.

## 7.2. Определение поверхностной твёрдости пирамидой Виккерса

Схема для определения **невосстановленной** **поверхностной твёрдости** пирамидой Виккерса.

$$HV_{\text{ПОВ}}^{\text{ИНД}} = \frac{F}{S_{\text{Б.ПОВ.}}^{\text{ИНД.}}}$$



$S_{\text{Б.ПОВ.}}^{\text{ИНД.}}$  – площадь боковой поверхности внедренной в материал части индентора

# Определение поверхностной твёрдости пирамидой Виккерса

С использованием в качестве индентора пирамиды Виккерса поверхностная твердость по методу **невосстановленного отпечатка** будет равна

$$HV_{\text{ПОВ}}^{\text{ИНД}} = \frac{F}{S_{\text{б.ПОВ.}}^{\text{ИНД.}}} = \frac{F \cos \left( \frac{\alpha}{2} \right)}{4 \text{tg} \left( \frac{\alpha}{2} \right) h_{\text{ИНД}}^2} = \frac{F}{26,429 h_{\text{ИНД}}^2} \quad (7.1)$$

где  $F$  – нагрузка на индентор, Н;  $S_{\text{б.ПОВ.}}^{\text{ИНД.}}$  – площадь боковой поверхности внедренной в материал части индентора, мм<sup>2</sup>;  $h_{\text{ИНД}}$  – глубина внедрения индентора в исследуемый материал, мм;  $\alpha$  – угол между противоположными гранями пирамиды.

# Определение поверхностной твёрдости пирамидой Виккерса

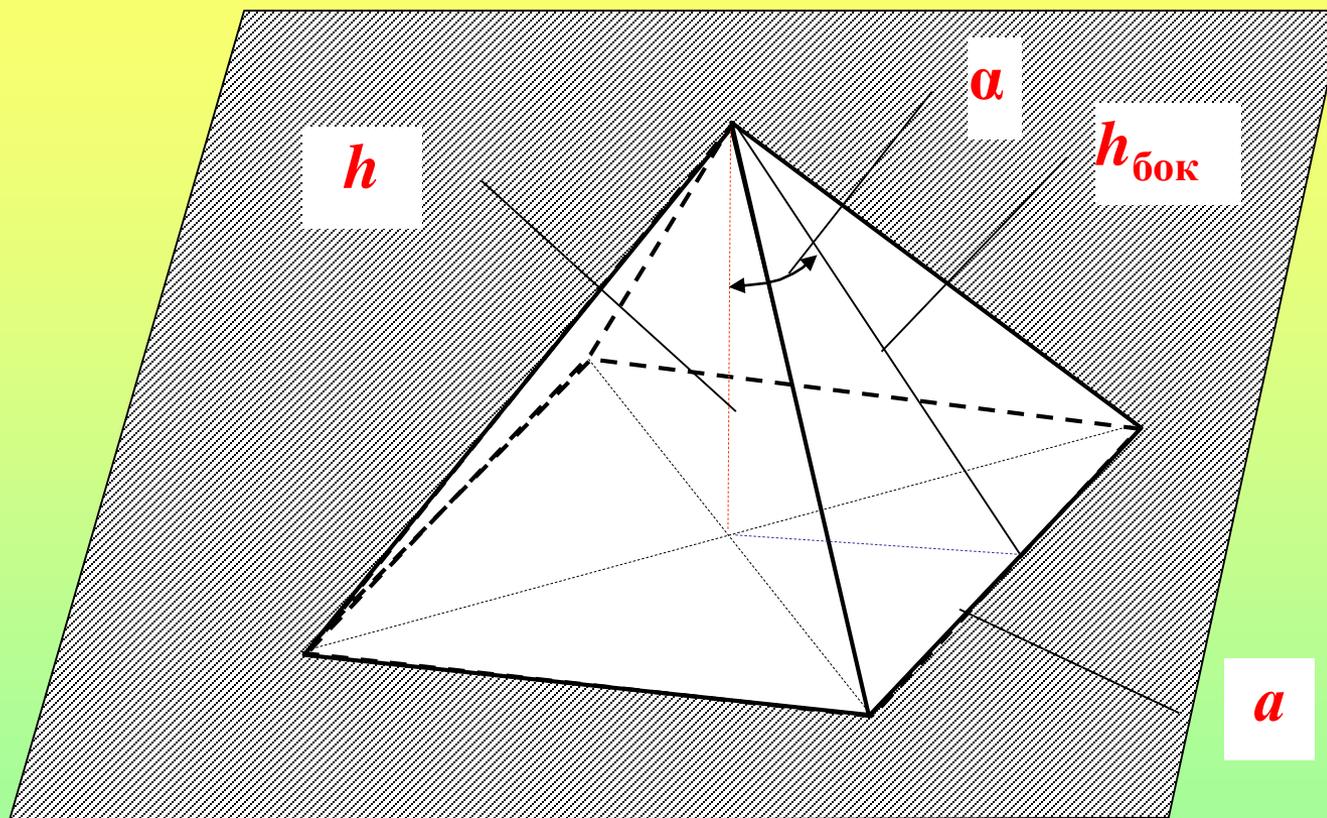
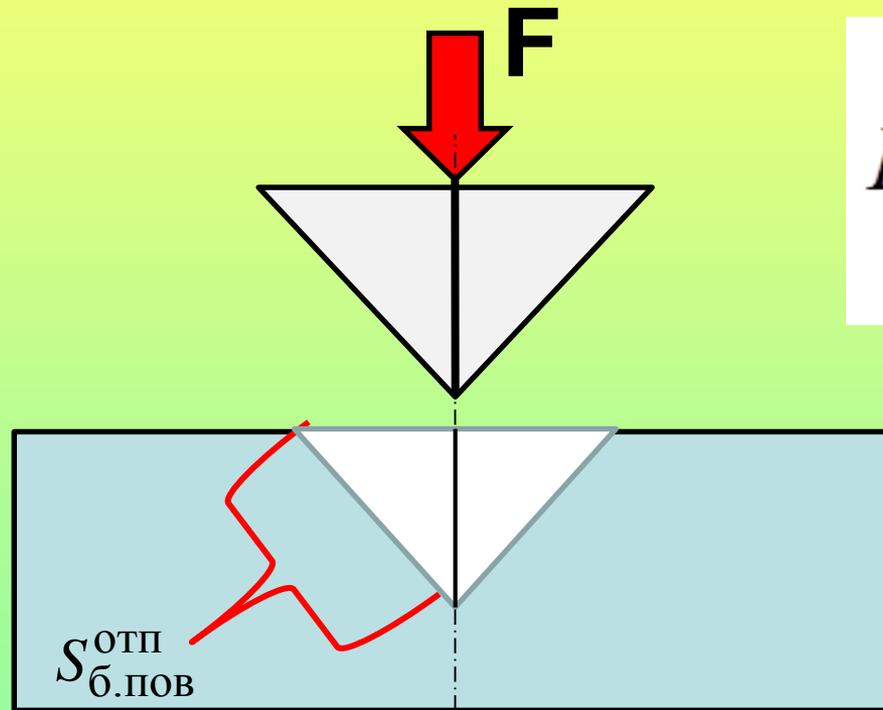


Схема пирамиды Виккерса

# Определение поверхностной твёрдости пирамидой Виккерса

Схема для определения **восстановленной** **поверхностной** **твёрдости** пирамидой Виккерса.



$$HV_{ПОВ}^{ОТП} = \frac{F}{S_{б.ПОВ}^{ОТП}}$$

$S_{б.ПОВ}^{ОТП}$  – площадь боковой поверхности восстановленного отпечатка.

# Определение поверхностной твёрдости пирамидой Виккерса

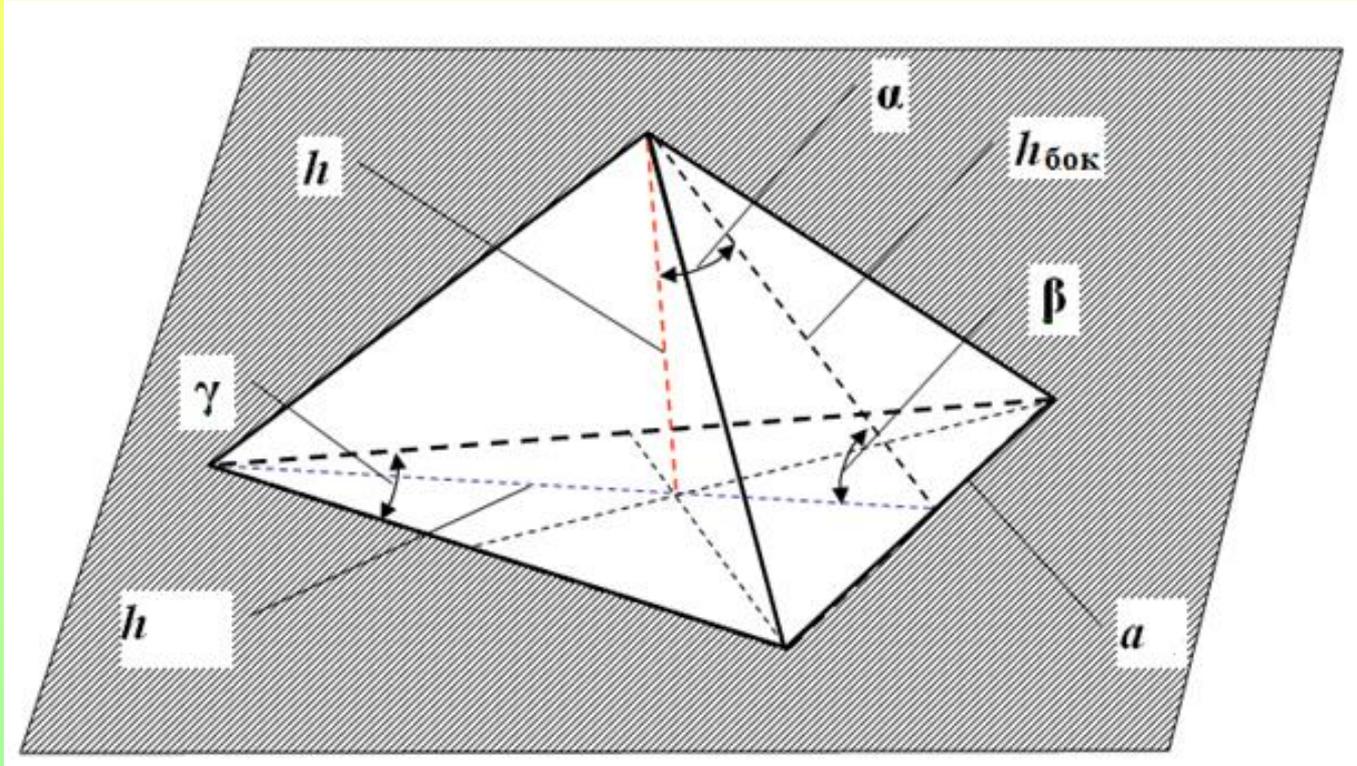
С использованием в качестве индентора пирамиды Виккерса поверхностная твердость по методу **восстановленного отпечатка** будет равна

$$HV_{\text{ПОВ}}^{\text{ОТП}} = \frac{F}{S_{\text{б.ПОВ}}^{\text{ОТП}}} \approx \frac{F}{26,429 \cdot h_{\text{ОТП}}^2} \approx \frac{49 \cdot F}{26,429 \cdot d_{\text{ОТП}}^2} \approx 1,854 \frac{F}{d_{\text{ОТП}}^2} \quad (7.2)$$

где –  $S_{\text{б.ПОВ}}^{\text{ОТП}}$  - площадь боковой поверхности отпечатка, мм<sup>2</sup>;  $h_{\text{ОТП}}$  – глубина отпечатка, мм;  $d_{\text{ОТП}}$  – диагональ отпечатка, мм.

Знак примерного равенства  $\approx$  означает, что площадь поверхности отпечатка приблизительно можно определить по предложенным выше формулам, в то время как фактическая площадь отпечатка является несколько иной и измерить ее достаточно сложно. Точно можно определить только внедрённую часть индентора.

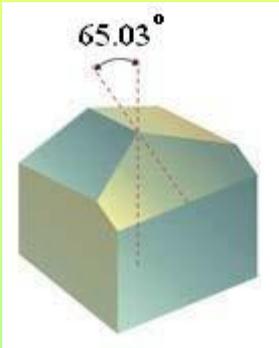
### 7.3. Определение поверхностной твёрдости пирамидой Берковича по методу невосстановленного отпечатка



$$HB_{\text{ПОВ}}^{\text{ИНД}} = \frac{F}{S_{\text{б.ПОВ.}}^{\text{ИНД.}}}$$

## 7.3. Определение поверхностной твёрдости пирамидой Берковича

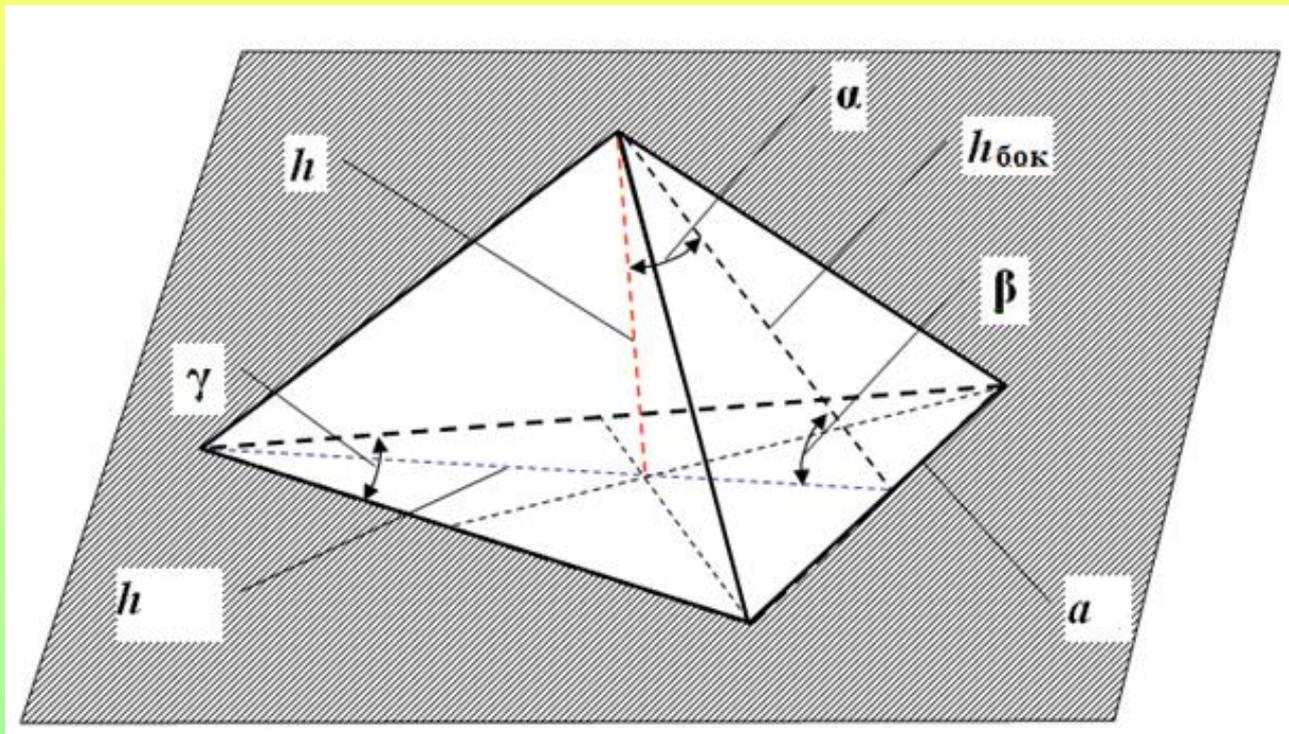
Поверхностная твердость по методу **невосстановленного отпечатка**, измеренная модифицированной пирамидой Берковича, будет равна



$$\begin{aligned}
 HB_{\text{ПОВ}}^{\text{ИНД}} &= \frac{F}{S_{\text{б.ПОВ.}}^{\text{ИНД.}}} = \frac{F \cos \alpha}{3h_{\text{ИНД}}^2 \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta} = \\
 &= \frac{F \cos 65,27^\circ}{3h_{\text{ИНД}}^2 \operatorname{tg} 65,27^\circ \cdot \operatorname{tg} 60^\circ} = \frac{F}{26,969h_{\text{ИНД}}^2},
 \end{aligned} \tag{7.3}$$

где  $F$  – нагрузка на индентор,  $S_{\text{б.ПОВ.}}^{\text{ИНД.}}$  – площадь боковой поверхности внедренной в материал части индентора,  $\text{мм}^2$ ;  $h_{\text{ИНД}}$  – глубина внедрения индентора в исследуемый материал,  $\text{мм}$ ;  $\alpha = 65,27^\circ$  – угол между высотой и апофемой пирамиды;  $\beta = 60^\circ$  – угол между сторонами основания пирамиды.

# Определение поверхностной твёрдости пирамидой Берковича по методу восстановленного отпечатка



$$HB_{ПОВ}^{ОТП} = \frac{F}{S_{б.ПОВ}^{ОТП}}$$

# Определение поверхностной твёрдости пирамидой Берковича

С использованием модифицированной пирамиды Берковича поверхностную твердость по методу восстановленного отпечатка можно рассчитать как

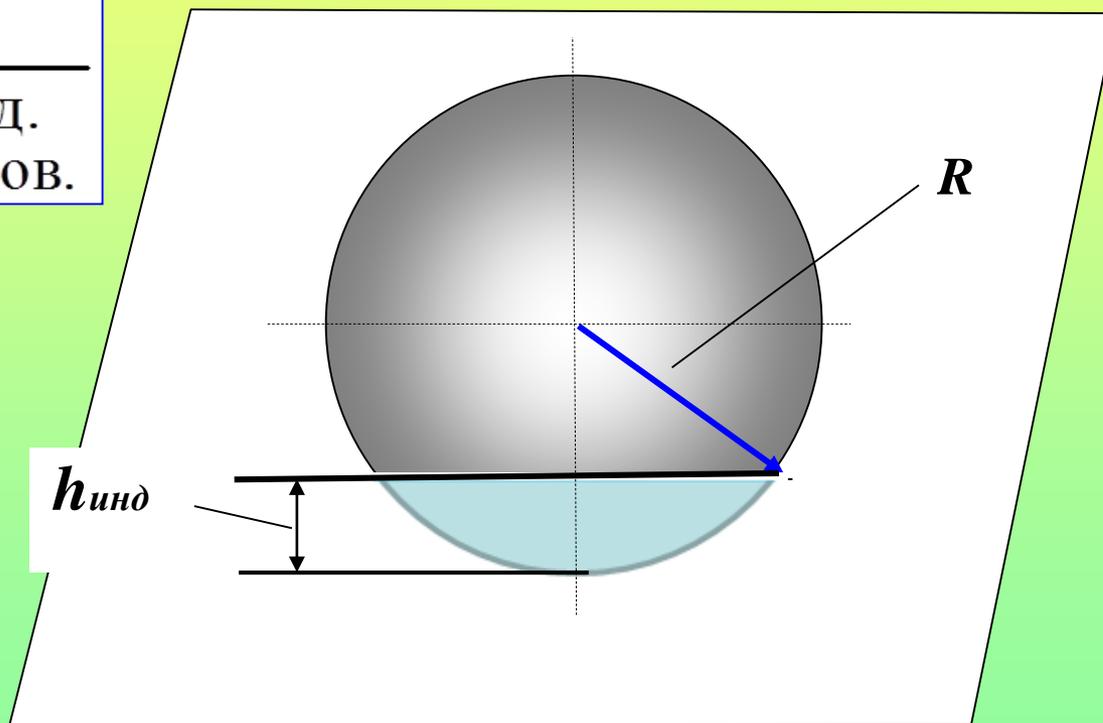
$$НБ_{\text{ПОВ}}^{\text{ОТП}} = \frac{F}{S_{\text{б.ПОВ}}^{\text{ОТП}}} \approx \frac{F}{26,969 \cdot h_{\text{ОТП}}^2} \quad (7.4)$$

где  $S_{\text{б.ПОВ}}^{\text{ОТП}}$  - площадь боковой поверхности отпечатка, мм<sup>2</sup>;  $h_{\text{ОТП}}$  - глубина отпечатка, мм.

## 7.4. Определение поверхностной твёрдости сферическим индентором

Для индентора в форме **шара** площадь поверхности внедрённой части индентора равна  $2\pi R h_{\text{инд}}$ .

$$HV_{\text{пов}}^{\text{инд}} = \frac{F}{S_{\text{б.пов.}}^{\text{инд.}}}$$



## 7.4. Определение поверхностной твёрдости сферическим индентором

Поверхностная твердость по методу невосстановленного отпечатка, измеренная сферическим индентором, будет равна

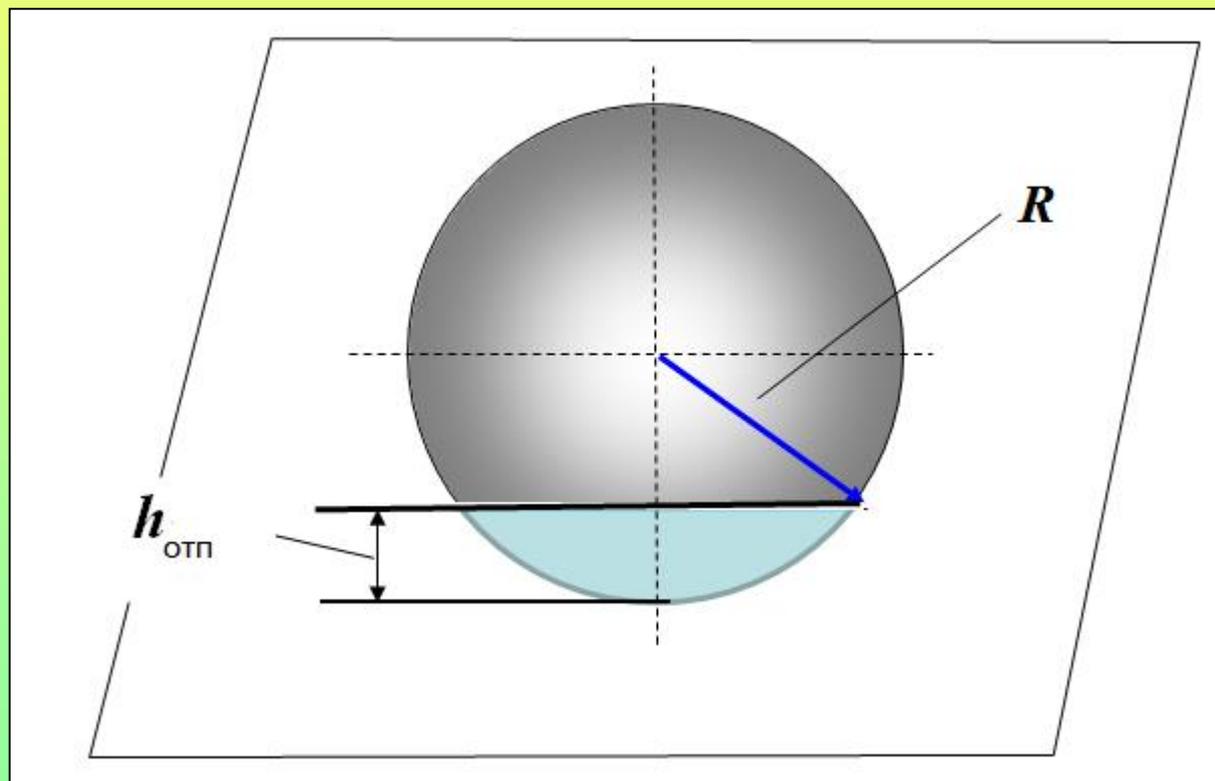
$$HV_{\text{ПОВ}}^{\text{ИНД}} = \frac{F}{S_{\text{б.ПОВ.}}^{\text{ИНД.}}} = \frac{F}{2\pi R h_{\text{ИНД}}} \quad (7.5)$$

где  $F$  – нагрузка на индентор, Н;  $S_{\text{б.ПОВ.}}^{\text{ИНД.}}$  – площадь боковой поверхности внедренной в материал части индентора, мм<sup>2</sup>;  $R$  – радиус сферического индентора, мм;  $h_{\text{ИНД}}$  – глубина внедрения индентора в исследуемый материал, мм.

# Определение поверхностной твёрдости сферическим индентором по методу восстановленного отпечатка

Для индентора в форме **шара** площадь поверхности отпечатка равна  $2\pi R h_{\text{отп.}}$ .

$$HB_{\text{ПОВ}}^{\text{отп}} = \frac{F}{S_{\text{б.пов.}}^{\text{отп.}}}$$



# Определение поверхностной твёрдости сферическим индентором

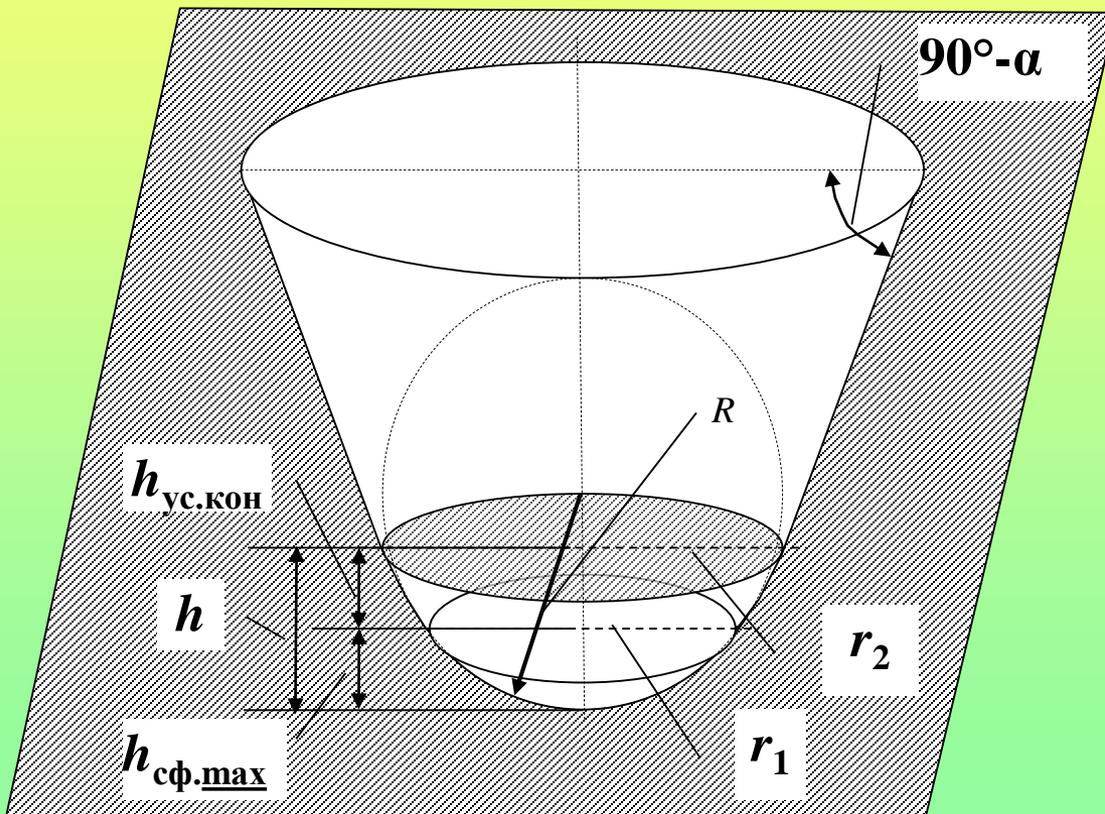
При индентировании сферическим индентором поверхностная твердость по методу восстановленного отпечатка соответствует

$$HV_{\text{ПОВ}}^{\text{ОТП}} = \frac{F}{S_{\text{б.ПОВ.}}^{\text{ОТП}}} \approx \frac{F}{2\pi R h_{\text{ОТП}}} \quad (7.6)$$

где –  $S_{\text{б.ПОВ.}}^{\text{ОТП}}$  - площадь боковой поверхности отпечатка, мм<sup>2</sup>;  
 $h_{\text{ОТП}}$  – глубина отпечатка, мм.

# 7.5. Определение поверхностной твёрдости сфероконическим индентором по методу невосстановленного отпечатка

Глубина внедрения индентора равна  $h_{\text{инд}} = h_{\text{сф.мах}} + h_{\text{ус.кон}}$



$$HV_{\text{ПОВ}}^{\text{ИНД}} = \frac{F}{S_{\text{б.ПОВ.}}^{\text{ИНД.}}}$$

# Определение поверхностной твёрдости сфероконическим индентором по методу невосстановленного отпечатка

С использованием **сфероконического индентора** с углом при вершине  $120^\circ$  и радиусом скругления вершины  $0,2$  мм поверхностная твердость по методу **невосстановленного отпечатка** будет равна

$$HR_{\text{пов}}^{\text{инд}120-0,2} = \frac{F}{S_{\text{б.пов.сф.ч.}}^{\text{инд.}} + S_{\text{б.пов.кон.ч.}}^{\text{инд.}}} = \quad (7.8)$$
$$= \frac{F}{2\pi R h_{\text{инд}} + (10,88 h_{\text{инд}}^2 + 0,668 h_{\text{инд}} - 0,026)},$$

где  $F$  – нагрузка на индентор, Н;  $S_{\text{б.пов.сф.ч.}}^{\text{инд.}}$  – площадь боковой поверхности внедренной в материал сферической части индентора,  $\text{мм}^2$ ;  $S_{\text{б.пов.кон.ч.}}^{\text{инд.}}$  – площадь боковой поверхности внедренной в материал конической части индентора,  $\text{мм}^2$ ;  $R$  – радиус закругления вершины индентора, мм;  $h_{\text{инд}}$  – глубина внедрения индентора в исследуемый материал, мм.

# Определение поверхностной твёрдости сфероконическим индентором

При индентировании сфероконическим индентором с углом при вершине  $120^\circ$  и радиусом скругления вершины  $0,35$  мм поверхностную твердость по методу невозстановленного отпечатка можно рассчитать как

$$\begin{aligned} HR_{\text{пов}}^{\text{инд}120-0,35} &= \frac{F}{S_{\text{б.пов.сф.ч.}}^{\text{инд.}} + S_{\text{б.пов.кон.ч.}}^{\text{инд.}}} = \\ &= \frac{F}{2\pi R h_{\text{инд}} + (10,88 h_{\text{инд}}^2 + 0,925 h_{\text{инд}} - 0,067)}, \end{aligned} \quad (7.9)$$

где  $R$  – радиус скругления вершины, мм;  $h_{\text{инд}}$  – глубина внедрения индентора в исследуемый материал, мм.

# Определение поверхностной твёрдости сфероконическим индентором

Для испытаний сфероконическим индентором с углом при вершине  $120^\circ$  и радиусом скругления вершины  $0,7$  мм поверхностную твердость по методу невосстановленного отпечатка можно записать как

$$\begin{aligned} HR_{\text{пов}}^{\text{инд}120-0,7} &= \frac{F}{S_{\text{б.пов.сф.ч.}}^{\text{инд.}} + S_{\text{б.пов.кон.ч.}}^{\text{инд.}}} = \\ &= \frac{F}{2\pi R h_{\text{инд}} + (10,88 h_{\text{инд}}^2 + 2,353 h_{\text{инд}} - 0,317)}, \end{aligned} \quad (7.10)$$

где  $R$  – радиус скругления вершины, мм;  $h_{\text{инд}}$  – глубина внедрения индентора в исследуемый материал, мм.

## 7.6. Определение поверхностной твёрдости сфероконическим индентором для наноизмерений

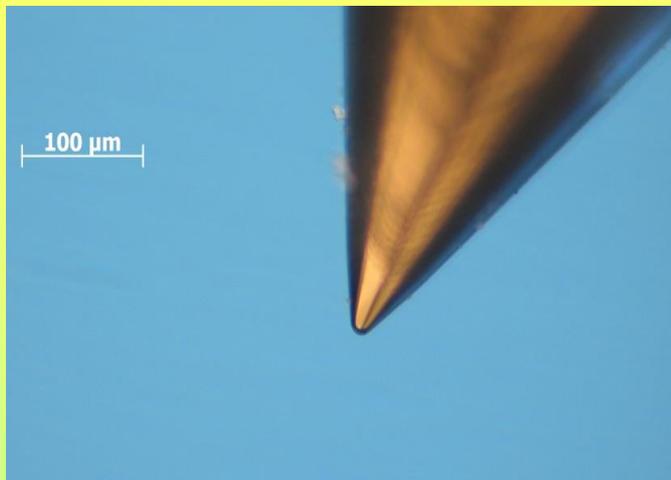
Поверхностная нанотвёрдость по методу **невосстановленного отпечатка**, измеренная **сфероконическим наноиндентором** с углом при вершине  $60^\circ$  и радиусом скругления вершины  $8600$  нм, будет равна

$$HR_{\text{пов}}^{\text{н.инд}60-8600} = \frac{F}{S_{\text{б.пов.сф.ч.}}^{\text{инд.}} + S_{\text{б.пов.кон.ч.}}^{\text{инд.}}} = \quad (7.11)$$

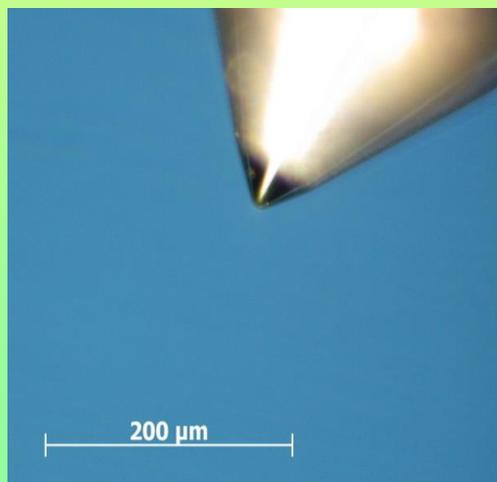
$$= \frac{F}{2\pi R h_{\text{инд}} + (2,09 h_{\text{инд}}^2 + 22805,45 h_{\text{инд}} - 10577173,84)},$$

где  $R$  – радиус скругления вершины, мм;  $h_{\text{инд}}$  – глубина внедрения индентора в исследуемый материал, мм.

# Сфероконические инденторы для наноизмерений



а



б

Рабочая часть сфероконических алмазных инденторов с различными геометрическими параметрами: а – сфероконический индентор с радиусом скругления вершины  $r = 8600$  нм и углом конуса при вершине  $\alpha = 60^\circ$ ; б – сфероконический индентор с радиусом скругления вершины  $r = 8600$  нм и углом конуса при вершине  $\alpha = 90^\circ$

# Определение поверхностной твёрдости сфероконическим индентором

При использовании сфероконического наноиндентора с углом при вершине  $90^\circ$  и радиусом скругления вершины 8600 нм поверхностная нанотвёрдость по методу **невосстановленного отпечатка** **соответствует**

$$\begin{aligned} HR_{\text{пов}}^{\text{н.инд}90-8600} &= \frac{F}{S_{\text{б.пов.сф.ч.}}^{\text{инд.}} + S_{\text{б.пов.кон.ч.}}^{\text{инд.}}} = \\ &= \frac{F}{2\pi R h_{\text{инд}} + (4,398 h_{\text{инд}}^2 + 31220,519 h_{\text{инд}} - 107920692)}, \end{aligned} \quad (7.12)$$

где  $R$  – радиус скругления вершины, мм;  $h_{\text{инд}}$  – глубина внедрения индентора в исследуемый материал, мм.

# Определение поверхностной твёрдости сфероконическим индентором

Поверхностная нанотвёрдость, определяемая по методу восстановленного отпечатка с применением сфероконического наноиндентора с углом при вершине  $60^\circ$  и радиусом скругления вершины 8600 нм, рассчитывается по формуле

$$HR_{\text{ПОВ}}^{\text{н.отп}60-8600} = \frac{F}{S_{\text{б.пов.сф.ч.}}^{\text{отп.}} + S_{\text{б.пов.кон.ч.}}^{\text{отп.}}} \approx \quad (7.13)$$

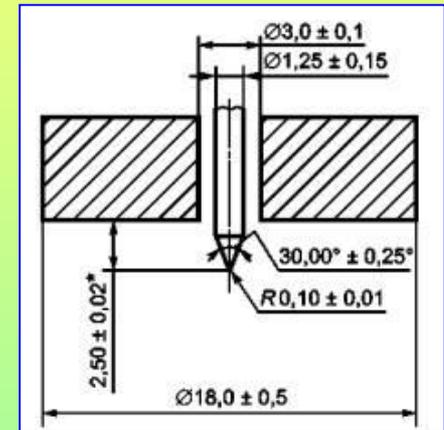
$$\approx \frac{F}{2\pi R h_{\text{отп}} + (2,09 h_{\text{отп}}^2 + 22805,45 h_{\text{отп}} - 10577173,84)},$$

где  $R$  – радиус скругления вершины, мм;  $h_{\text{инд}}$  – глубина внедрения индентора в исследуемый материал, мм.

## 7.7. Определение поверхностной твёрдости индентором Шора

Поверхностную твердость, определяемую по невосстановленному отпечатку методом Шора с использованием цилиндрического индентора ( $\varnothing 1,25$  мм) с вершиной в виде усеченного конуса с углом  $35^\circ$ , можно записать формулой

$$HSA_{\text{ПОВ}}^{\text{ИНД}} = \frac{F}{S_{\text{б.ПОВ.}}^{\text{ИНД}}} = \frac{F}{S_{\text{б.ПОВ.КОН.}}^{\text{ИНД}} + S_{\text{б.ПОВ.ЦИЛ.}}^{\text{ИНД}}} \quad (7.14)$$



где  $S_{\text{б.ПОВ.}}^{\text{ИНД}}$  – площадь боковой поверхности внедренной в материал части индентора;  $S_{\text{б.ПОВ.КОН.}}^{\text{ИНД}}$  – площадь боковой поверхности конической части индентора, внедренной в материал;  $S_{\text{б.ПОВ.ЦИЛ.}}^{\text{ИНД}}$  – площадь боковой поверхности цилиндрической части индентора, внедренной в материал;  $h_{\text{ИНД}}$  – глубина внедрения индентора в исследуемый материал, мм.

# Определение поверхностной твёрдости индентором Шора

Если  $h_{\text{инд}} \leq 0,327$  мм, тогда

$$S_{\text{б.пов.}}^{\text{инд}} = S_{\text{б.пов.кон.}}^{\text{инд}} = 3,912h \quad (7.15)$$

Если  $h_{\text{инд}} > 0,327$  мм, тогда

$$\begin{aligned} S_{\text{б.пов.}}^{\text{инд}} &= S_{\text{б.пов.кон.}}^{\text{инд}} + S_{\text{б.пов.цил.}}^{\text{инд}} = 3,912h + 3,927h - 1,292 = \quad (7.16) \\ &= 7,839h - 1,292 \end{aligned}$$

С учетом (7.15) и (7.16) при глубине внедрения индентора больше 0,327 мм поверхностная твердость по Шору (шкала А) равна

$$HSA_{\text{пов}}^{\text{инд}} = \frac{F}{S_{\text{б.пов.кон.}}^{\text{инд}} + S_{\text{б.пов.цил.}}^{\text{инд}}} = \frac{F}{7,839h - 1,292} \cdot (7.17)$$

# Определение поверхностной твёрдости индентором Шора

Поверхностная твердость, измеряемая с помощью твердомера Шора:

 учитывает упругую и пластическую деформации при индентировании,

 может применяться для исследования металлических и неметаллических материалов,

 не зависит от параметров отпечатка,

 полностью соответствует классическому определению понятия «твердость» и, по совокупности вышеприведенных характеристик, является одним из основных методов определения твердости материалов.

# Список литературы к лекции 7

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) Мощенок В.И., Лалазарова Н.А., Ляпин А.А. Определение объёмной нанотвёрдости материалов // Вестник ХНАДУ.-2009.-Вып. 51-С. 62-64

3) В.И.Мощенок, Н.А.Лалазарова, М.М.Ляховицкий, И.Е.Кухарева, В.А.Скрыпников. Современные методики определения макро-, микро- и нанотвёрдости материалов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. научн. трудов.- Харьков, Национальн. Аэрокосмич. ун-т им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», 2010.-Вип. 1 (61).-С.104-107



# **Контрольные вопросы**

**1. В чём сущность поверхностной твёрдости?**

**2. Как определяют поверхностную твёрдость по методу восстановленного отпечатка пирамидой Виккерса?**

**3. Как определяют поверхностную твёрдость по методу невосстановленного отпечатка пирамидой Виккерса?**

**4. Чем отличается пирамида Виккерса от пирамиды Берковича?**

# **Задания для самостоятельной работы**

**1. Вывести формулу поверхностной твёрдости для пирамиды Виккерса.**

**2. Вывести формулу поверхностной твёрдости для сфероконического индентора.**



# Кафедра технології металлов и матеріалознавства

Лалазарова Наталиа Алексеевна

E-mail: [lalaz1991@mail.ru](mailto:lalaz1991@mail.ru)

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

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

