



«Методы определения твёрдости и прочности материалов»

Лекция 8

Lec_8_metod_opr_tverd_3MC_LNA_23_09_2015

**Методики определения
объёмной твердости.**

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

Содержание

- ✦ 8.1. Объёмная твёрдость
- ✦ 8.2. Определение объёмной твёрдости пирамидой Виккерса
- ✦ 8.3. Определение объёмной твёрдости пирамидой Берковича
- ✦ 8.4. Определение объёмной твёрдости сферическим индентором
- ✦ 8.5. Определение объёмной твёрдости сфероконическим индентором
- ✦ 8.6. Определение объёмной твёрдости сфероконическим индентором для нанодиапазона
- ✦ 8.7. Определение объёмной твёрдости индентором Шора
- ✦ Список литературы к лекции 8
- ✦ Контрольные вопросы
- ✦ Задания для самостоятельной работы



8.1. Объёмная твёрдость

Способы определения твердости металлов, заключающиеся в отношении нагрузки или работы индентирования к объему полученного отпечатка, назывались методами определения твердости по Русселю, Холлнагелю, по Шпету, по Мартелю.

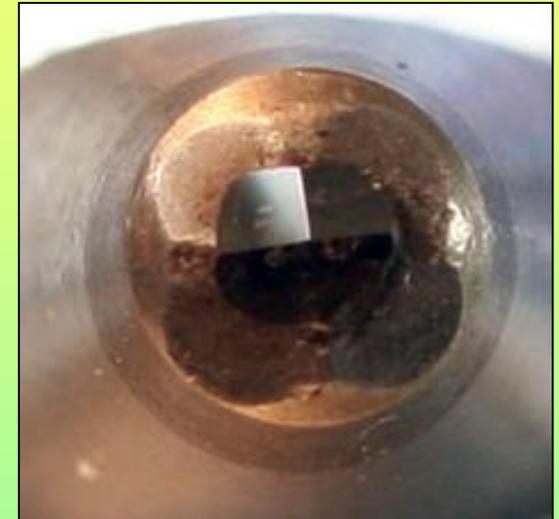
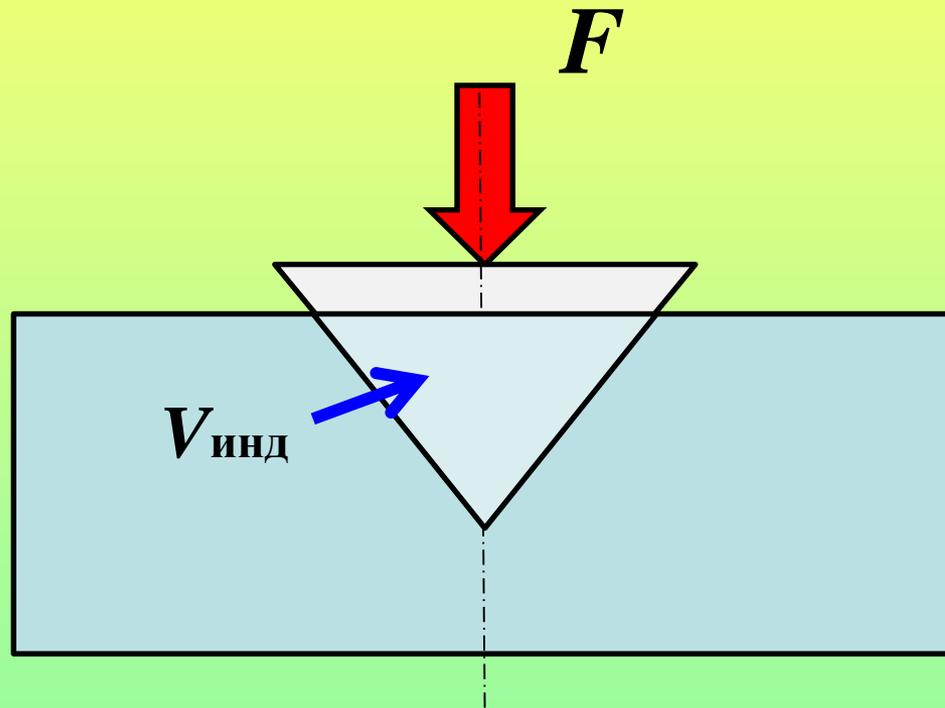
Объёмная твёрдость

Все эти методы, а также предложенный нами способ, заключающийся в отношении нагрузки к объему внедренной в материал части индентора, предложено объединить общим термином – **«объемная твердость»**.



8.2. Определение объёмной твёрдости пирамидой Виккерса

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



$V_{\text{инд}}$ – объём внедренной в материал части индентора



Определение объёмной твёрдости пирамидой Виккерса по методу невосстановленного отпечатка

$$HV_{об}^{инд} = \frac{F}{V_{инд}}$$

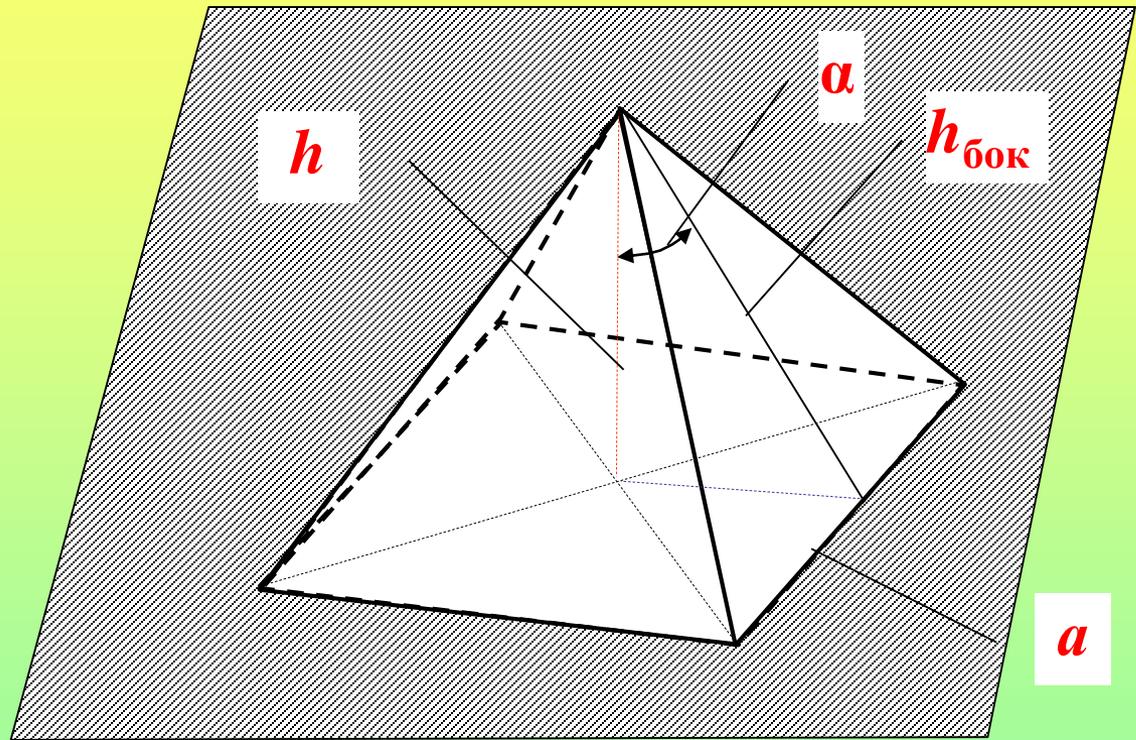


Схема пирамиды Виккерса



Определение объёмной твёрдости пирамидой Виккерса

При испытаниях пирамидой Виккерса объёмная твердость по методу невозстановленного отпечатка будет равна

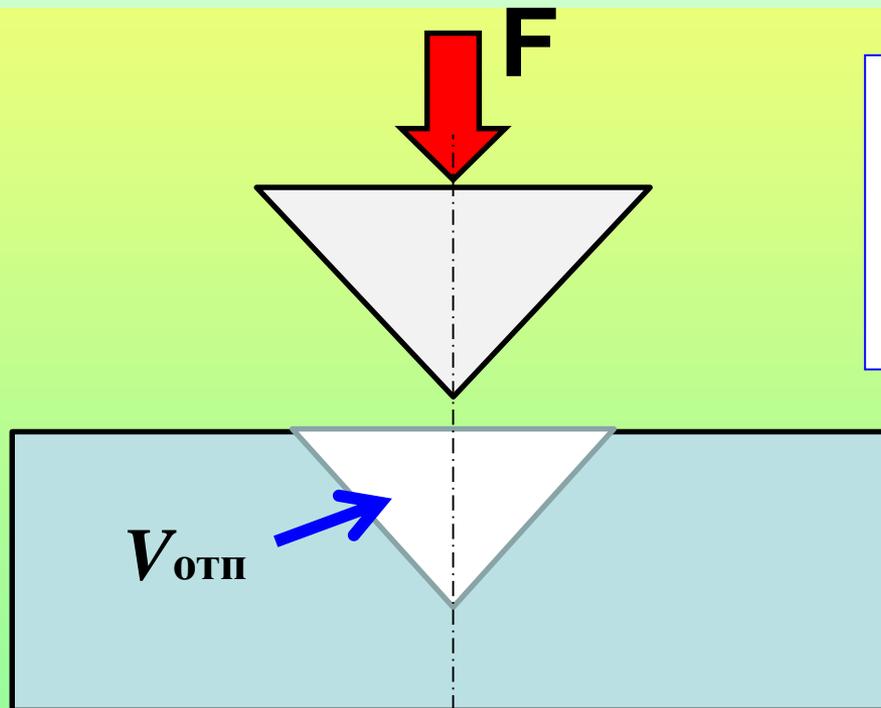
$$HV_{об}^{инд} = \frac{F}{V_{инд}} = \frac{3F}{h_{инд}^2 \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) h_{инд}} = \frac{F}{8,168 h_{инд}^3} \quad (8.1)$$

где F – нагрузка на индентор, Н; $V_{инд}$ – объем внедренной в материал части индентора, мм³; $h_{инд}$ – глубина внедрения индентора в исследуемый материал, мм; α – угол между противоположными гранями пирамиды.



Определение объёмной твёрдости пирамидой Виккерса по методу восстановленного отпечатка

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



$$HV_{об}^{отп} = \frac{F}{V_{отп}}$$

$V_{отп}$ – объём восстановленного отпечатка.



Определение объёмной твёрдости пирамидой Виккерса по методу восстановленного отпечатка

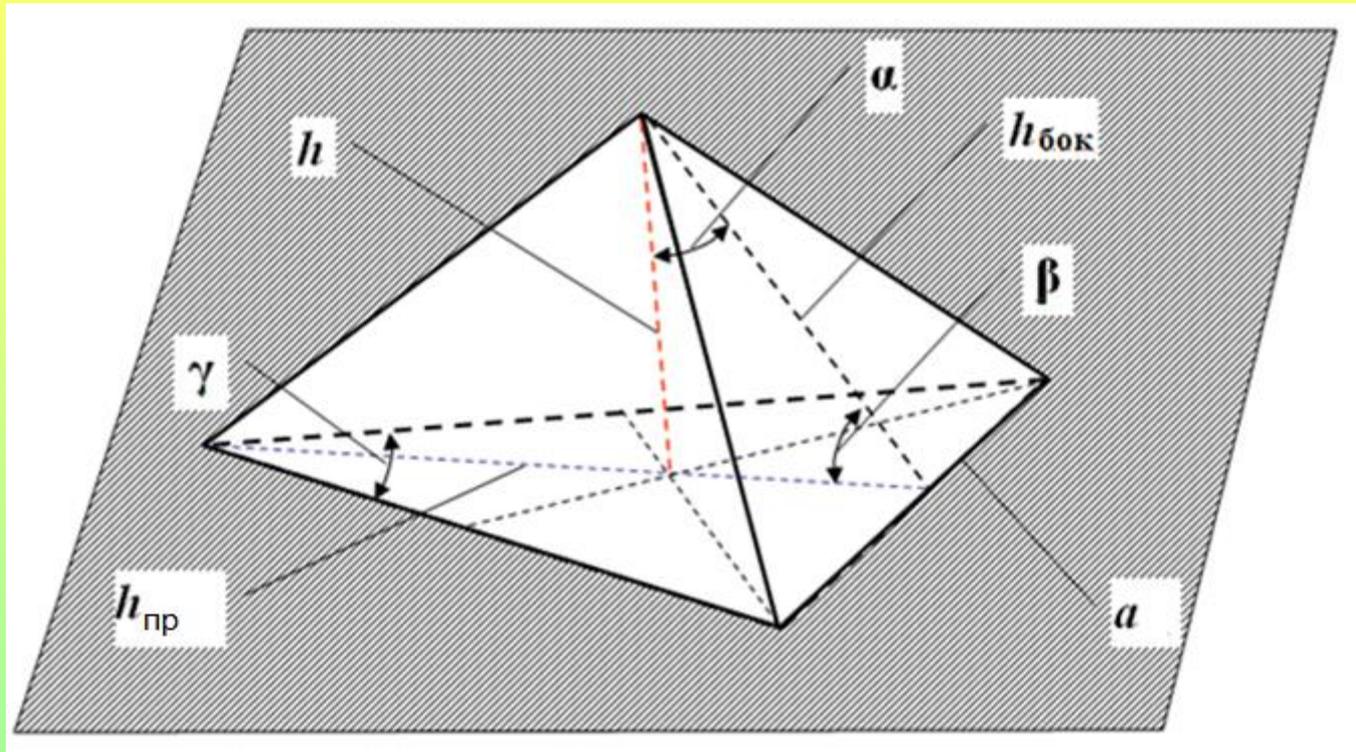
С использованием в качестве индентора пирамиды Виккерса поверхностная твердость по методу **восстановленного отпечатка** будет равна

$$HV_{об}^{отп} = \frac{F}{V_{отп}} \approx \frac{F}{8,168h_{отп}^3} \quad (8.2)$$

где F – нагрузка на индентор, Н; $V_{отп}$ – объем отпечатка, мм³; $h_{отп}$ – глубина внедрения индентора в исследуемый материал, мм.



8.3. Определение объёмной твёрдости пирамидой Берковича

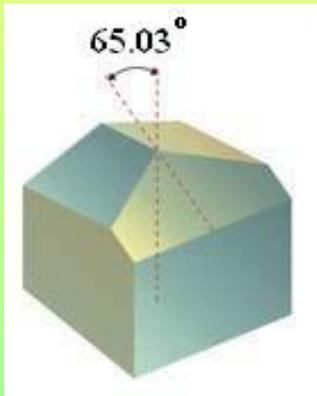


$$HB_{\text{об}}^{\text{инд}} = \frac{F}{V_{\text{инд}}}$$

объёмная твёрдость пирамидой Берковича по методу невосстановленного отпечатка

Определение объёмной твёрдости пирамидой Берковича по методу невосстановленного отпечатка

При индентировании модифицированной пирамидой Берковича объёмная твердость по методу невосстановленного отпечатка будет равна

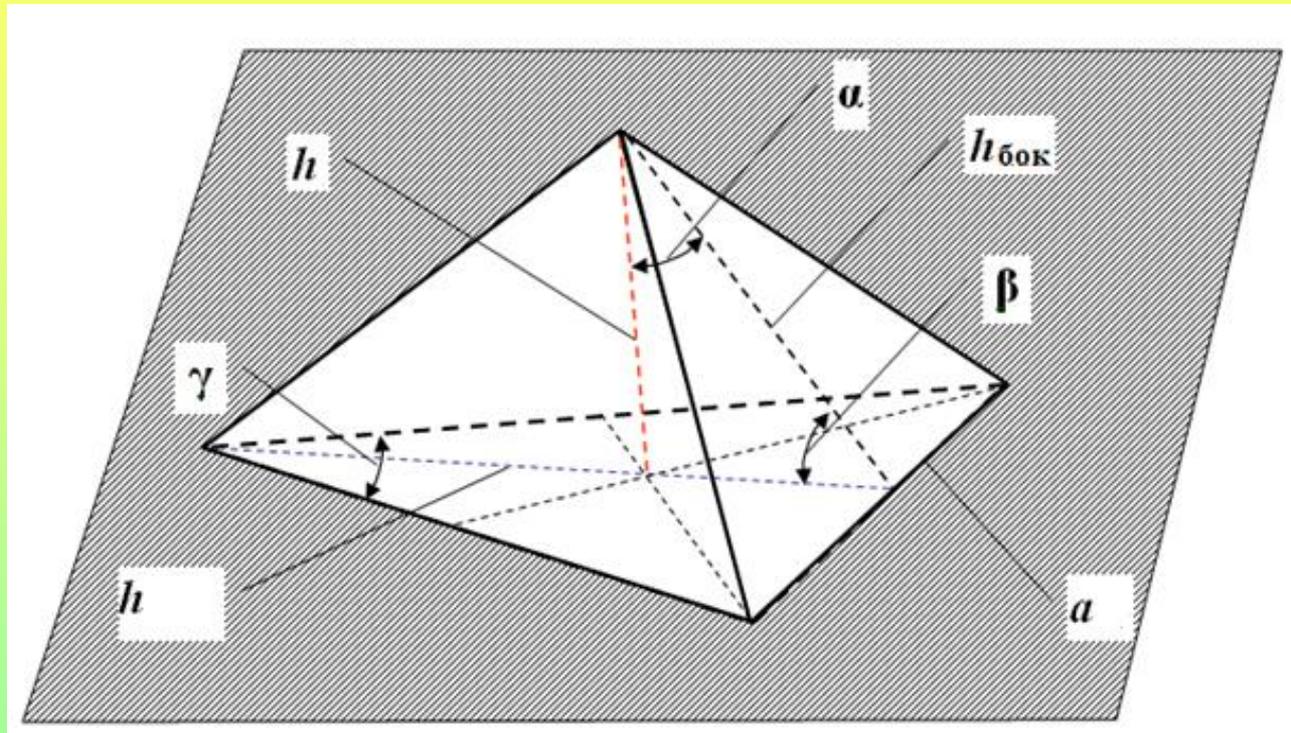


$$\begin{aligned} HB_{об}^{инд} &= \frac{F}{V_{инд}} = \frac{F \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg}^2 \beta}{3h_{инд}^3} = \\ &= \frac{F \operatorname{tg} 60^\circ \operatorname{tg}^2 24,73^\circ}{3h_{инд}^3} = \frac{F}{8,165h_{инд}^3}, \end{aligned} \quad (8.3)$$

где F – нагрузка на индентор, Н; $V_{инд}$ – объем внедренной в материал части индентора, мм^3 ; $h_{инд}$ – глубина внедрения индентора в исследуемый материал, мм; γ – угол между сторонами основания пирамиды; β – угол между апофемой и высотой основания пирамиды.



Определение объёмной твёрдости пирамидой Берковича по методу восстановленного отпечатка



$$HB_{об}^{отп} = \frac{F}{V_{отп}}$$

объёмная твёрдость пирамидой Берковича по методу восстановленного отпечатка



Определение объёмной твёрдости пирамидой Берковича по методу восстановленного отпечатка

При использовании в качестве индентора модифицированной пирамиды Берковича объёмная твёрдость по методу восстановленного отпечатка соответствует

$$НБ_{об}^{отп} = \frac{F}{V_{отп}} \approx \frac{F}{8,165h_{отп}^3} \quad (8.4)$$

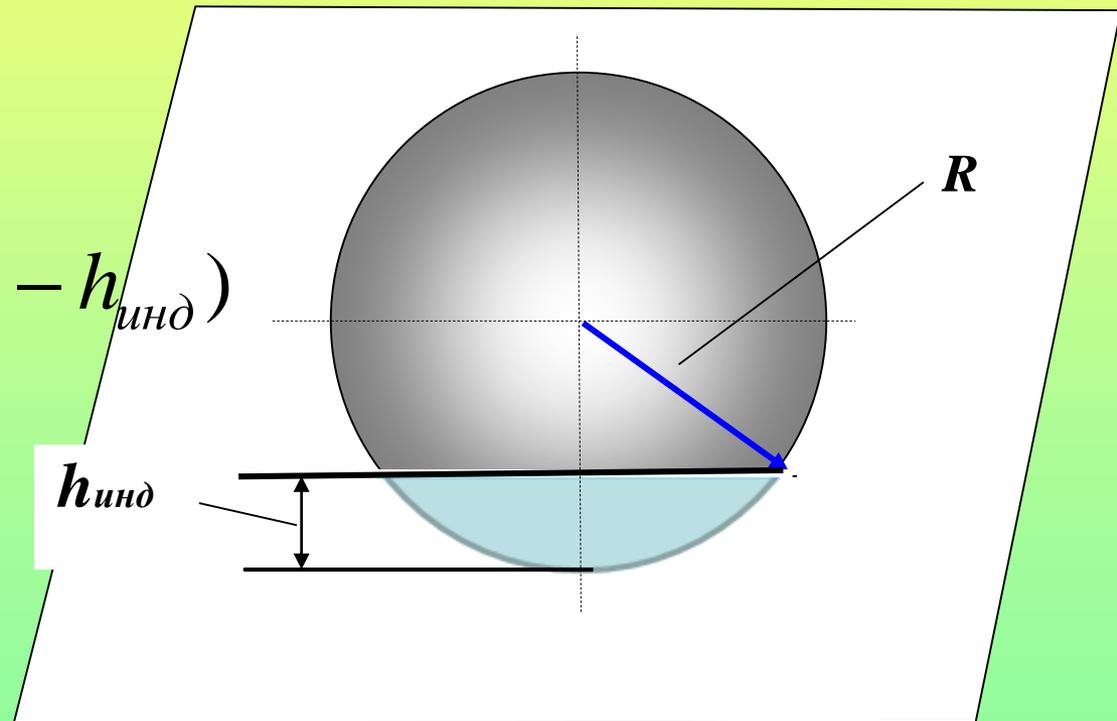
где F – нагрузка на индентор, Н; $V_{отп}$ – объём отпечатка, мм³;
 $h_{отп}$ – глубина отпечатка, мм.



8.4. Определение объёмной твёрдости сферическим индентором

Для индентора в форме **шара** объём внедрённой части индентора равен

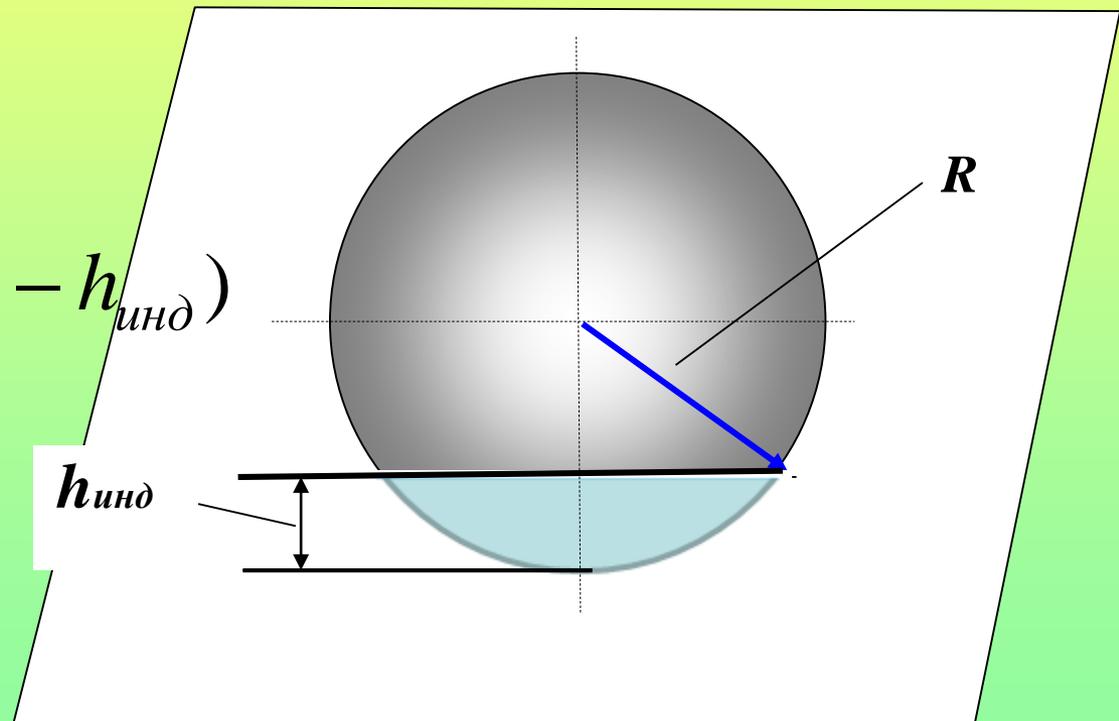
$$V_{\text{инд}} = \frac{1}{3} \pi h_{\text{инд}}^2 (3r - h_{\text{инд}})$$



Определение объёмной твёрдости сферическим индентором

Для индентора в форме **шара** объём внедрённой части индентора равен

$$V_{\text{инд}} = \frac{1}{3} \pi h_{\text{инд}}^2 (3r - h_{\text{инд}})$$



Определение объёмной твёрдости сферическим индентором по методу невосстановленного отпечатка

При использовании в качестве индентора шарика объёмную твердость предлагается определять по формуле (для метода невосстановленного отпечатка)

$$HV_{об}^{инд} = \frac{F}{V_{инд}} = \frac{F}{1,047 \cdot h_{инд}^2 (3R - h_{инд})} \quad (8.5)$$

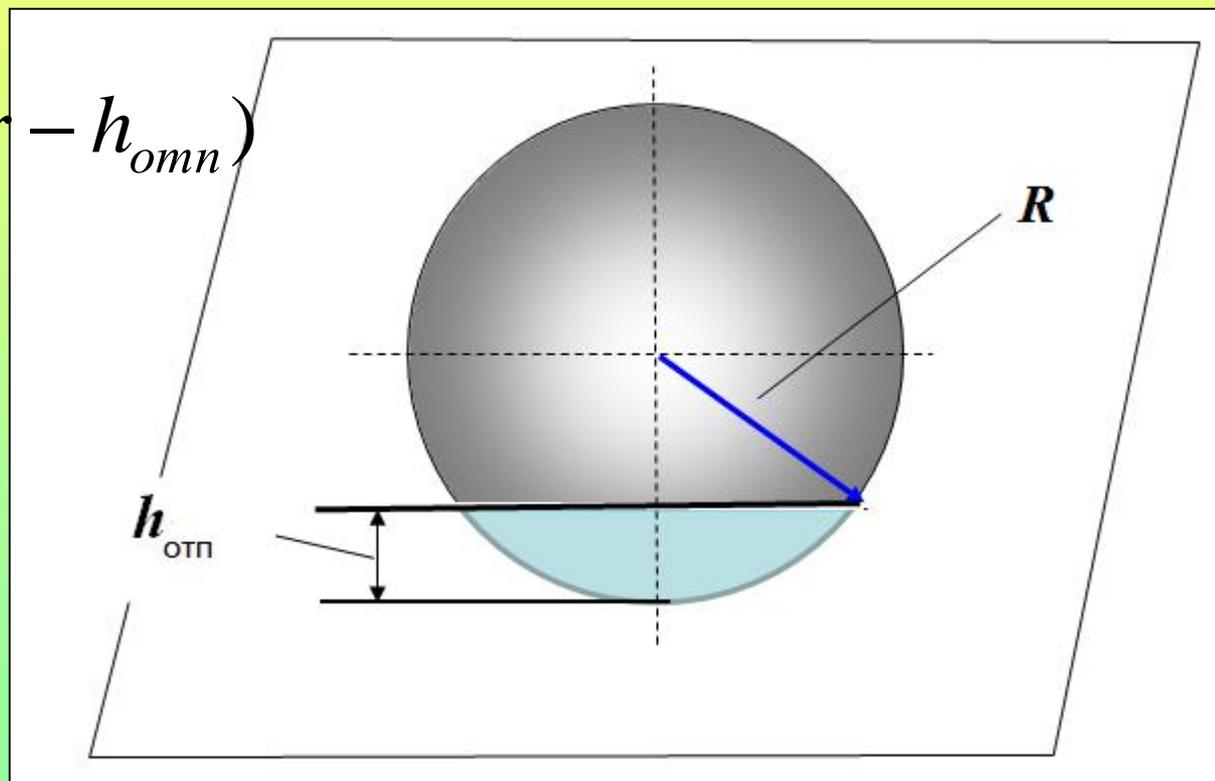
где F – нагрузка на индентор, Н; $V_{инд}$ – площадь боковой поверхности внедренной в материал части индентора, мм²; R – радиус сферического индентора, мм; $h_{инд}$ – глубина внедрения индентора в исследуемый материал, мм.



Определение поверхностной твёрдости сферическим индентором по методу восстановленного отпечатка

Для индентора в форме **шара** объём отпечатка равен

$$V_{отп} = \frac{1}{3} \pi h_{отп}^2 (3r - h_{отп})$$



Определение поверхностной твёрдости сферическим индентором по методу восстановленного отпечатка

При индентировании сферическим индентором поверхностная твердость по методу восстановленного отпечатка соответствует

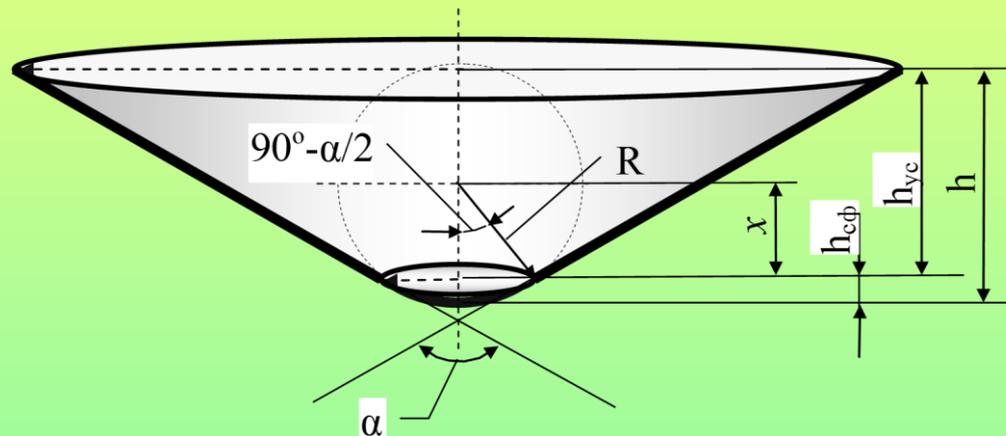
$$HB_{об}^{отп} = \frac{F}{V_{отп}} \approx \frac{F}{1,047 \cdot h_{отп}^2 (3R - h_{отп})} \quad (8.6)$$

где – $V_{отп}$ - объем отпечатка, мм³; $h_{отп}$ – глубина отпечатка, мм.



8.5. Определение объёмной твёрдости сфероконическим индентором

При внедрении сфероконического индентора в исследуемый материал, до определенной глубины внедренная часть индентора представляет собой сферу, а больше этой глубины – сферу, плавно переходящую в усеченный конус. Для расчета этой глубины воспользуемся следующей схемой $h_{\text{инд}} = h_{\text{сф.мах}} + h_{\text{ус.кон.}}$.



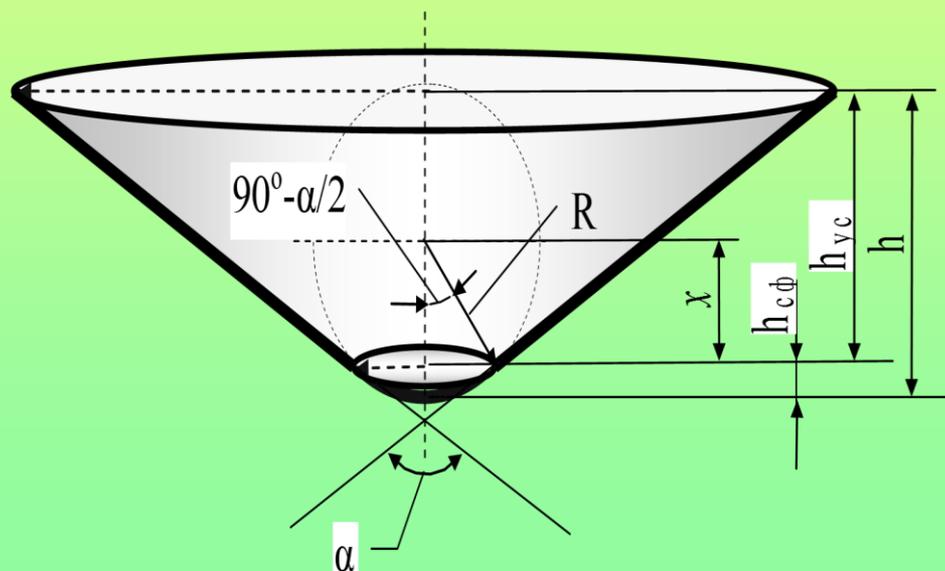
$h_{\text{сф}}$ – максимальная глубина внедрения сферической части индентора; $h_{\text{ус}}$ – глубина внедрения конической части индентора; h – общая глубина внедрения индентора

Схема к расчету площади проекции сечения сфероконического индентора на основную плоскость: α – угол при вершине между образующими усеченного конуса; R – радиус закругления вершины индентора; x – расстояние между центром скругления вершины индентора и меньшим основанием конуса;

Определение объёмной твёрдости сфероконическим индентором по методу невосстановленного отпечатка

Как следует из геометрических соотношений, максимальную высоту сферической части сфероконического индентора можно рассчитать по следующей формуле

$$h_{\text{сф}} = R - R \cos\left(90^\circ - \frac{\alpha}{2}\right) = R\left(1 - \cos\left(90^\circ - \frac{\alpha}{2}\right)\right) \quad (8.7)$$



где R – радиус скругления вершины индентора, мм; α – угол при вершине между образующими усеченного конуса в градусах.



Определение объёмной твёрдости сфероконическим индентором по методу невосстановленного отпечатка

При индентировании сфероконическим индентором с углом при вершине 120° и радиусом ее скругления $0,2$ мм, объемная твердость по методу невосстановленного отпечатка равна при глубине внедрения индентора $h \leq 0,027$ мм (внедряется только сферическая часть):

$$HV_{об}^{инд120-0,2} = \frac{F}{1,047 \cdot h_{инд}^2 (3R - h_{инд})} \quad (8.8)$$

где F – нагрузка на индентор, Н; R – радиус скругления вершины индентора, мм; $h_{инд}$ – глубина внедрения индентора в исследуемый материал, мм;



Определение объёмной твёрдости сфероконическим индентором по методу невозстановленного отпечатка

при глубине внедрения индентора $h > 0,027$ мм
(внедряется сферическая и коническая часть)

$$\begin{aligned} HR_{об}^{инд120-0,2} &= \frac{F}{V_{сф.ч.}^{инд.} + V_{кон.ч.}^{инд.}} = \frac{F}{1,047 \cdot h_{инд}^2 (3R - h_{инд}) + V_{кон.ч.}^{инд.}} = \\ &= F / (1,047 \cdot h_{инд}^2 (3R - h_{инд}) + \\ &+ (3,1414h_{инд}^3 + 0,2906h_{инд}^2 + 0,0089h_{инд} - 0,0005)) = \\ &= \frac{F}{3,1414h_{инд}^3 + 0,2906h_{инд}^2 + 0,0089h_{инд} - 0,00006}, \end{aligned} \quad (8.9)$$

где $V_{сф.ч.}^{инд.}$ – объем внедренной в материал сферической части индентора, мм³; $V_{кон.ч.}^{инд.}$ – объем внедренной в материал конической части индентора, мм³.



Определение объёмной твёрдости сфероконическим индентором по методу невосстановленного отпечатка

Объёмная твердость, определяемая по методу невосстановленного отпечатка при использовании сфероконического индентора с углом при вершине 120° и радиусом скругления вершины $0,35$ мм, равна:

а) при глубине внедрения индентора $h \leq 0,046$ мм – аналогично формуле (7.9)

б) при глубине внедрения индентора $h > 0,046$ мм

$$\begin{aligned} HR_{об}^{\text{инд}120-0,35} &= \frac{F}{V_{\text{сф.ч.}}^{\text{инд.}} + V_{\text{кон.ч.}}^{\text{инд.}}} = \\ &= \frac{F}{3,1414h_{\text{инд}}^3 + 0,364h_{\text{инд}}^2 + 0,0208h_{\text{инд}} - 0,0021}, \end{aligned} \quad (8.10)$$



Определение объёмной твёрдости сфероконическим индентором по методу невозстановленного отпечатка

Объёмная твердость, определяемая по методу невозстановленного отпечатка при использовании сфероконического индентора с углом при вершине 120° и радиусом скругления вершины $0,35$ мм, равна:

а) при глубине внедрения индентора $h \leq 0,046$ мм – аналогично формуле (7.9)

б) при глубине внедрения индентора $h > 0,046$ мм

$$HR_{об}^{инд120-0,35} = \frac{F}{V_{сф.ч.}^{инд.} + V_{кон.ч.}^{инд.}} =$$
$$= \frac{F}{3,1414h_{инд}^3 + 0,364h_{инд}^2 + 0,0208h_{инд} - 0,0021}, \quad (8.11)$$

где F – нагрузка на индентор, Н; $h_{инд}$ – глубина внедрения индентора в исследуемый материал, мм.



Определение объёмной твёрдости сфероконическим индентором по методу невозстановленного отпечатка

Для сфероконического индентора с углом при вершине 120° и радиусом скругления вершины $0,7$ мм, объемная твердость по методу невозстановленного отпечатка равна:

а) при глубине внедрения индентора $h \leq 0,094$ мм – аналогично формуле (7.9)

б) при глубине внедрения индентора $h > 0,094$ мм

$$HR_{об}^{инд120-0,7} = \frac{F}{V_{сф.ч.}^{инд.} + V_{кон.ч.}^{инд.}} = \quad (8.12)$$

$$= \frac{F}{3,1414h_{инд}^3 + 1,018h_{инд}^2 + 0,11h_{инд} - 0,022}.$$



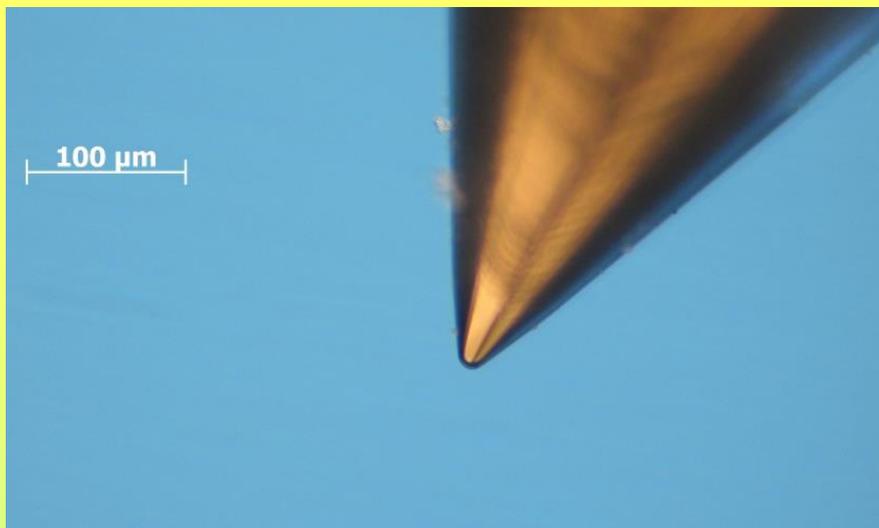
8.6. Определение объёмной твёрдости инденторами для нанодиапазона

При использовании сфероконического наноиндентора с углом при вершине 60° и радиусом скругления вершины 8600 нм объёмная нанотвёрдость по методу невосстановленного отпечатка равна:

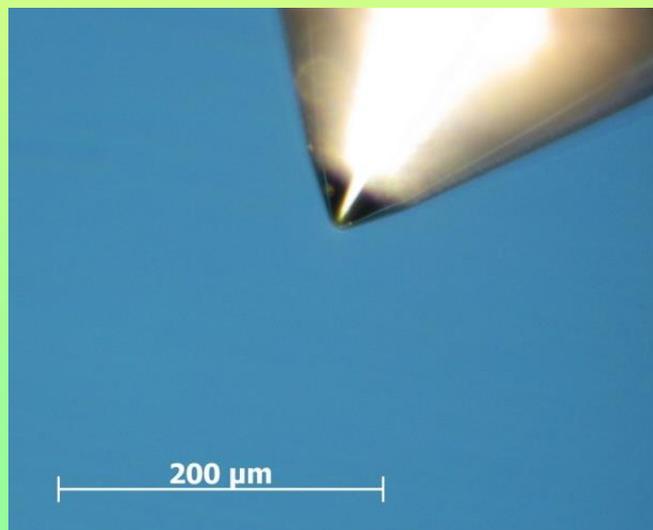
а) а) при глубине внедрения индентора $h \leq 4300$ нм – аналогично формуле (7.9) (радиус вершины индентора 8600 нм) ($1\text{нм}=10^{-9}$ м)

б) при глубине внедрения индентора $h > 4300$ нм

$$\begin{aligned} HR_{об}^{н.инд60-8600} &= \frac{F}{V_{сф.ч.}^{инд.} + V_{кон.ч.}^{инд.}} = F / (1,047 \cdot h_{инд}^2 (3R - h_{инд}) + \\ &+(0,349h_{инд}^3 + 9000h_{инд}^2 + 77465070h_{инд} - 527198826998)) = \quad (8.13) \\ &= \frac{F}{0,349h_{инд}^3 + 9000h_{инд}^2 + 77465070h_{инд} - 52779489468), \end{aligned}$$



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 объёмной твёрдости инденторами для нанодиапазона

Объёмная нанотвёрдость, определяемая по методу невозстановленного отпечатка сфероконическим наноиндентором с углом при вершине 90° и радиусом скругления вершины 8600 нм, равна:

а) при глубине внедрения индентора $h \leq 2519$ нм – аналогично формуле (7.9)

б) при глубине внедрения индентора $h > 2519$ нм

$$\begin{aligned} HR_{\text{об}}^{\text{н.инд}90-8600} &= \frac{F}{V_{\text{сф.ч.}}^{\text{инд.}} + V_{\text{кон.ч.}}^{\text{инд.}}} = \\ &= \frac{F}{1,047 \cdot h_{\text{инд}}^2 (3R - h_{\text{инд}}) + V_{\text{кон.ч.}}^{\text{инд.}}} = \\ &= F / (1,047 \cdot h_{\text{инд}}^2 (3R - h_{\text{инд}}) + (1,047h_{\text{инд}}^3 + 11188h_{\text{инд}}^2 + \\ &\quad + 39857707h_{\text{инд}} - 188089106499)) = \end{aligned} \tag{8.14}$$
$$= \frac{F}{1,047h_{\text{инд}}^3 + 11188h_{\text{инд}}^2 + 39852518h_{\text{инд}} - 188110499426}$$



Определение объёмной твёрдости инденторами для нанодиапазона

При индентировании сфероконическим наноиндентором с углом при вершине 60° и радиусом скругления вершины 8600 нм объёмная нанотвёрдость по методу восстановленного отпечатка равна

$$HR_{об}^{н.отп60-8600} = \frac{F}{V_{сф.ч.}^{отп.} + V_{кон.ч.}^{отп.}} \approx \quad (8.15)$$

$$\approx \frac{F}{0,349h_{отп}^3 + 9000h_{отп}^2 + 77465070h_{отп} - 52779489468)},$$



Определение объёмной твёрдости инденторами для нанодиапазона

Поверхностная нанотвёрдость, измеряемая по методу восстановленного отпечатка сфероконическим наноиндентором с углом при вершине 90° и радиусом скругления вершины 8600 нм, равна

$$HR_{\text{ПОВ}}^{\text{н.отп}90-8600} = \frac{F}{V_{\text{сф.ч.}}^{\text{отп.}} + V_{\text{кон.ч.}}^{\text{отп.}}} \approx \quad (8.16)$$

$$\approx \frac{F}{1,047h_{\text{отп}}^3 + 11188h_{\text{отп}}^2 + 39852518h_{\text{отп}} - 188110499426}.$$



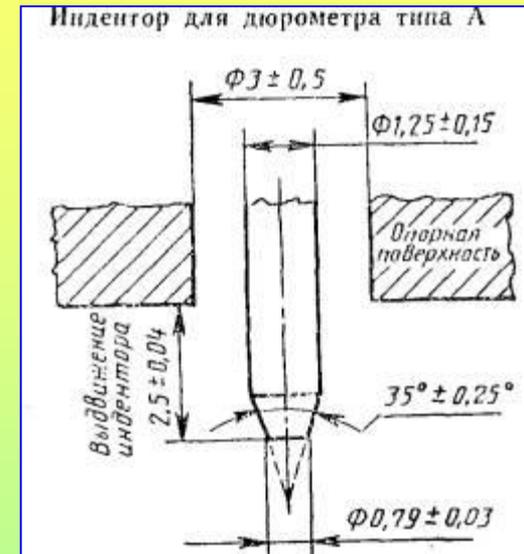
8.7. Определение объёмной твёрдости индентором Шора

Объемную твердость, определяемую по невосстановленному отпечатку, методом Шора (шкала А), можно определить по формуле:

$$HSA_{об}^{инд} = \frac{F}{V_{инд}} = \frac{F}{V_{ус.кон.} + V_{цил}}$$

где $V_{ус.кон.}$ - объем внедренной в материал конической части индентора, мм³; $V_{цил}$ - объем внедренной в материал цилиндрической части индентора, мм³.

где F – нагрузка на индентор, Н; $h_{инд}$ – глубина внедрения индентора в исследуемый материал, мм.

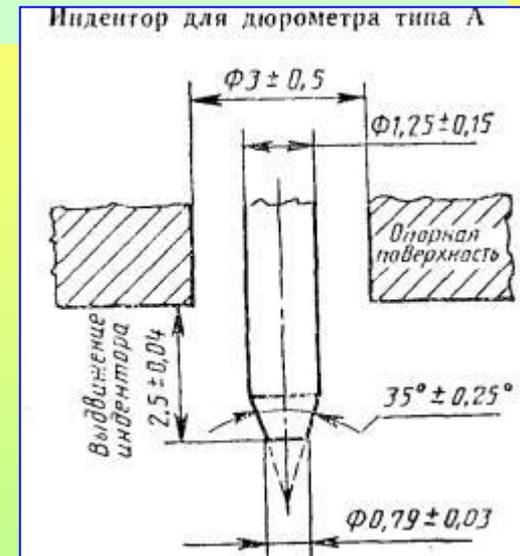


Определение объёмной твёрдости индентором Шора

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

$$HSA_{\text{об}}^{\text{инд}} = \frac{F}{V_{\text{ус.кон.}}} = \frac{F}{0,831 \cdot h_{\text{ус.к}}}$$

где $h_{\text{ус.кон.}} = h$ - глубина внедрения индентора в исследуемый материал, мм.



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

$$HSA_{\text{об}}^{\text{инд}} = \frac{F}{V_{\text{ус.кон.}} + V_{\text{цил}}} = \frac{F}{1,227h - 0,13}$$

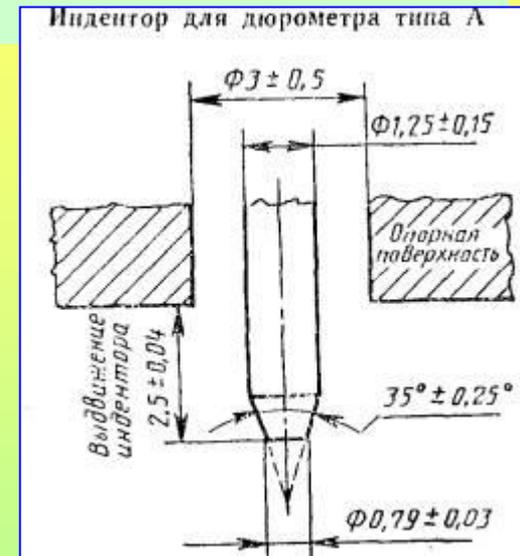


Определение объёмной твёрдости индентором Шора

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

$$HSA_{\text{об}}^{\text{инд}} = \frac{F}{V_{\text{ус.кон.}}} = \frac{F}{0,831 \cdot h_{\text{ус.к}}}$$

где – $h_{\text{ус.кон.}}=h$ - глубина внедрения индентора в исследуемый материал, мм.



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

$$HSA_{\text{об}}^{\text{инд}} = \frac{F}{V_{\text{ус.кон.}} + V_{\text{цил}}} = \frac{F}{1,227h - 0,13}$$



Список литературы к лекции 8

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 объёмной твёрдости?

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

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

4. Как определяют объёмную твёрдость по методу невосстановленного отпечатка сфероконическим индентором?



Задания для самостоятельной работы

1. Выяснить преимущества и области применения объёмной твёрдости.

2. Изучить существующие до настоящего времени методы определения объёмной 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

