



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

## **Лекция 2**

**Общая характеристика  
методов определения  
твёрдости вдавливанием.**

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

# Содержание

✦ 2.1. Метод Реомюра.

✦ 2.2. Метод Родмана.

✦ 2.3. Метод Герца.

✦ 2.4. Метод Кальверта–Джонсона.

✦ 2.5. Метод Бринелля.

✦ 2.6. Метод Роквелла.

✦ 2.7. Метод Виккерса.

# Содержание



**2.8. Определение объёмной твёрдости.**



**2.9. Метод кинетической твердости**



**2.10. Макро-, микро- и нанодиапазоны определения твердости.**



**2.11. Определение макротвёрдости**



**2.12. Определение микротвёрдости**

## 2.1. Метод Реомюра

Понятие твердости металлов известно человечеству уже более 280 лет. Впервые изобрел метод определения твердости в 1722 г. Реомюр Рене Антуан (1683-1757) (Reaumur),

французский  
естествоиспытатель,  
почетный член  
Петербургской  
Академии наук.



Р. Реомюр

Сущность этого  
метода  
определения  
твердости  
заключалась **во**  
**вдавливании** **двух**  
**треугольных** **призм**  
**одна** **в** **другую**  
**ребрами,**

**расположенными под прямым углом и измерении впоследствии полученных углублений.**

## 2.2. Метод Герца

Генрих Герц не только предложил конкретный способ определения твердости, но и разработал теорию внедрения сферы в плоское полупространство.

Герц оценивал твердость по границе перехода от упругой к пластической деформации при вдавливании индентора .

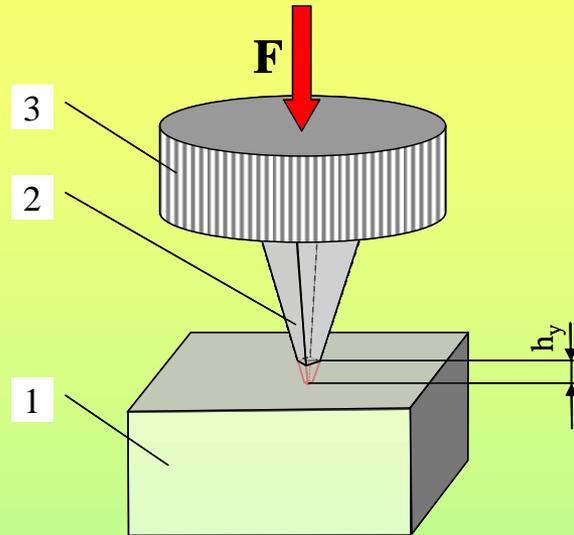
Хотя этот метод и не прижился в дальнейшем в силу сложности регистрации момента перехода от упругой к пластической деформации, необходимо по достоинству оценить его основополагающий вклад в развитие науки о твердости материалов.

Именно «герцевская» твердость характеризовала сопротивление материала, правда на начальном этапе нагрузочной ветви диаграммы индентирования при внедрении индентора в исследуемый материал.

## 2.3. Метод Родмана

В 1901 г. в энциклопедическом словаре Брокгауза и Ефрона был описан метод определения твердости **Родмана**.

Сущность метода определения твердости по Родману заключалась во **вдавливании** **стального закаленного ножа с сильно вытянутым ромбическим основанием (индентора)** под действием силы тяжести **стандартного груза**.



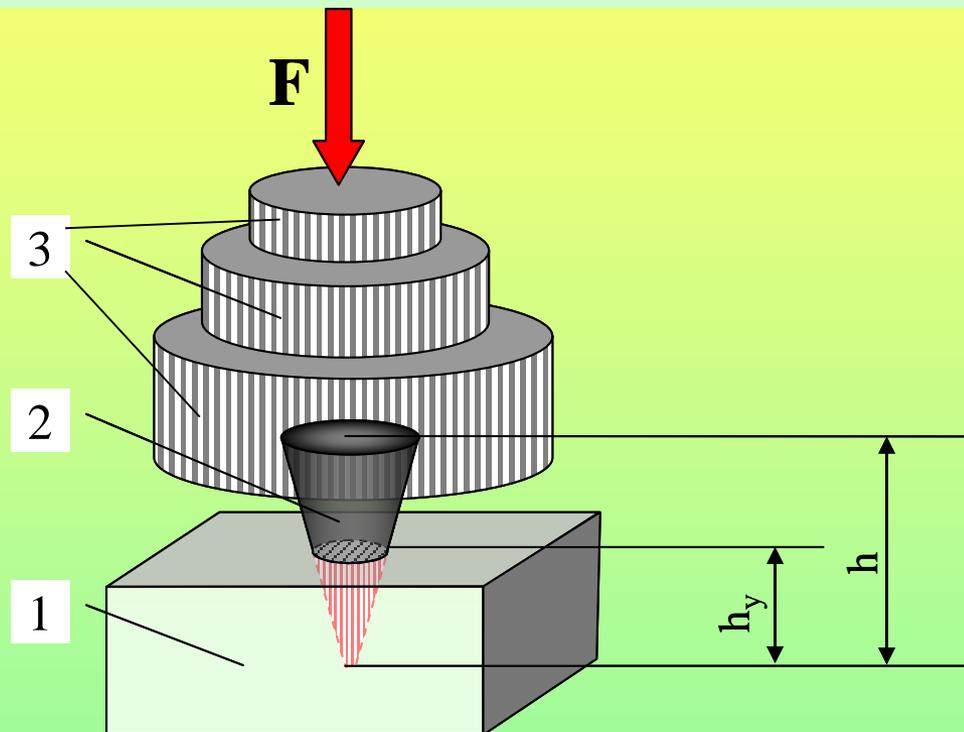
Значение твердости при этом было обратно пропорционально величине **объема углубления** индентора в исследуемый металл.

Схема измерения твердости по Родману [6]: 1 – исследуемый образец; 2 – стальной закаленный нож с сильно вытянутым ромбическим основанием (индентор); 3 – стандартный груз определенной массы;  $h_y$  – величина углубления индентора в исследуемый образец; F – нагрузка.

По методу Родмана твердость мягкого серого чугуна принималась равной 1000, а других металлов и сплавов располагалась в следующей последовательности по убыванию: сталь (958), железо (948), платина (375), медь (301), алюминий (271), серебро (208), цинк (183), золото (167), кадмий (108), висмут (52), олово (27), свинец (16). Таким образом, твердость определялась **величиной углубления стального закаленного ножа (индентора) под определенной стандартной нагрузкой**.

## 2.4. Кальверта–Джонсона

За меру твердости по **Кальверту и Джонсону** принималась **величина груза, необходимого для вдавливания закаленного стального усеченного конуса определенных размеров до половины его высоты.**



Методы оценки твердости Родмана и Кальверта и Джонсона в той или иной мере характеризуют сопротивление твердого тела внедрению в него индентора.

Схема измерения твердости по Кальверту и Джонсону [6]:  
1 – исследуемый образец; 2 – закаленный стальной усеченный конус (индентор); 3 – набор грузов различной массы;  $h_y$  – величина углубления индентора в исследуемый образец;  $h$  – высота индентора;  $F$  – нагрузка.

## 2.5. Метод Бринелля

В 1901 г., вопреки трактовке твердости как способности материала сопротивляться изменению формы при внедрении в него более твердого тела, И.А. **Бринелль** публикует новый метод, который характеризует конечный результат такого сопротивления, – после снятия нагрузки вдавливания и регистрации параметров восстановленного отпечатка.

Твердость же  
И.А. Бринелль  
предлагает  
рассчитывать **как**  
**отношение**  
**нагрузки** **к**  
**площади**  
**поверхности**  
**восстановленного**  
**отпечатка.**

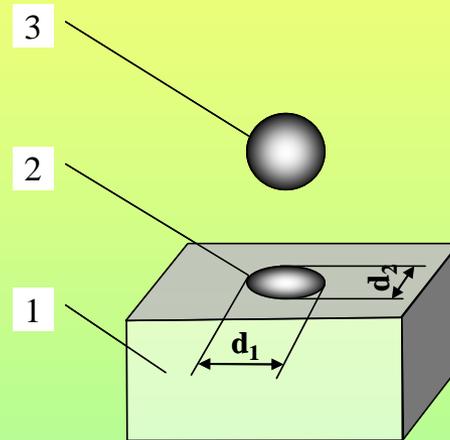


Схема измерения твердости по Бринеллю: 1 – исследуемый образец; 2 – отпечаток; 3 – индентор;  $d_1$ ,  $d_2$  – диаметры отпечатка.

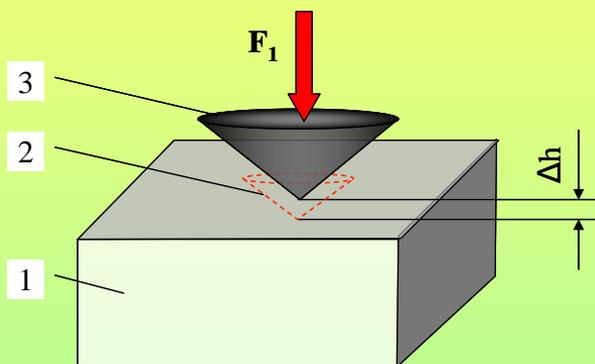
При этом сам процесс сопротивления материала по мере внедрения в него индентора игнорируется, а **фиксируется только факт локальной пластической деформации** образца после снятия нагрузки и отвода индентора

Получается, что «герцевская» твердость или упругое сопротивление материала при внедрении индентора не учитывается, а фиксируется только параметр пластичности, т.е. отпечаток.

## 2.6. Метод Мейера, Роквелла

Аналогично поступает и **Е. Мейер**, предлагая в 1908 г. в качестве параметра отпечатка использовать площадь его проекции на поверхность образца, а **твердость оценивать отношением приложенной ранее к индентору нагрузки к площади проекции восстановленного отпечатка.**

В 1922 г. американский металлург С.П. **Роквелл** излагает свой метод измерения твердости,



согласно которому твердость оценивается разностью глубин внедрения конического или сферического индентора под действием последовательно прилагаемых к нему предварительной и основной нагрузок.

Схема измерения твердости по Роквеллу [41]: 1 – исследуемый на твердость образец; 2 – след внедренной в образец части индентора при действии предварительной  $F_1$  и основной нагрузок; 3 – индентор;  $\Delta h$  – разность глубин внедрения.

Этот метод также не фиксирует процесс сопротивления материала внедрению индентора, а в качестве параметра твердости используется глубина внедрения индентора, измеренная в относительных единицах после снятия предварительной нагрузки

## 2.7. Метод Виккерса

В 1925 г. Р.Л. Смит и Д.Е. Сандланд предложили метод определения твердости, заключающийся во внедрении в образец **пирамидального индентора с квадратным основанием**.

Число твердости рассчитывается как отношение приложенной ранее к индентору нагрузки к площади боковой поверхности восстановленного отпечатка.

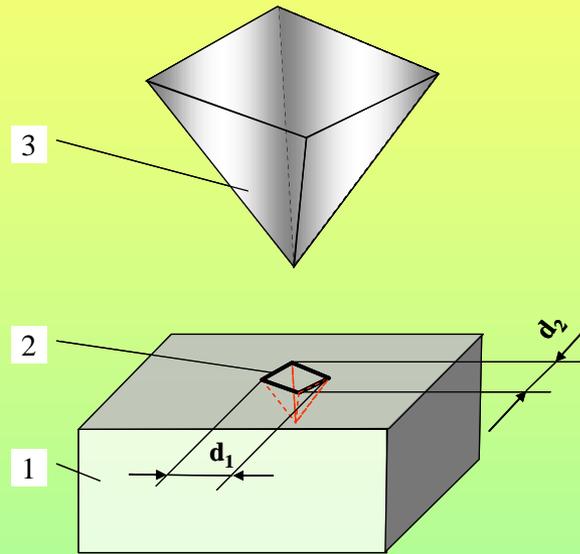


Схема измерения твердости по Виккерсу: 1 – исследуемый образец; 2 – след отпечатка индентора; 3 – индентор;  $d_1$ ,  $d_2$  – диагонали отпечатка.

Этот метод получил название концерна, в котором работали инженеры, – метод **Виккерса**. При этом, как и в методе Бринелля, не учитывается процесс сопротивления материала при внедрении индентора,

а регистрируются только параметры восстановленного отпечатка после снятия нагрузки на индентор. Метод **Виккерса**, как и метод Бринелля, характеризует в большей степени **пластичность материала** в локальной зоне деформации, чем твердость, т.е. сопротивление материала внедрению индентора.

## 2.8. Определение объёмной твёрдости

Для определения твёрдости можно использовать не только площадь полученного отпечатка, но и его объём.

Используя в качестве параметра при определении твёрдости объём восстановленного отпечатка, **Т.Ф. Руссель** в 1918 г., а затем **Х.Р.Холлнагель** в 1926 г., оценивают твёрдость отношением нагрузки к объёму восстановленного отпечатка.

**Мартель** предлагает определять твёрдость как отношение работы к объёму восстановленного отпечатка, а **Шпет** – как отношение максимальной нагрузки к произведению площади поверхности и глубины восстановленного отпечатка.

Проведя сокращения в формулах, характеризующих отношение работы к объёму отпечатка, ряд авторов получают в конечном итоге отношение нагрузки к площади проекции отпечатка.

# Определение объёмной твёрдости

Однако **М.С. Дрозд** считает, что отношение работы к объёму восстановленного отпечатка является весьма условной характеристикой, не поддающейся ясному физическому толкованию.

А вот **отношению нагрузки к объёму восстановленного отпечатка** Комиссаров А.П. с коллегами предлагают уделить большее внимание и такое отношение предлагают назвать **объёмной твёрдостью**.

Все вышеприведенные методы характеризуют не сопротивление материала внедрению в него индентора,

а конечный результат такого сопротивления, когда упругая деформация восстановлена и о твёрдости судят по размерам отпечатка, т.е. только по пластической составляющей деформации.

## 2.9. Метод кинетической твердости

Наиболее близко к физическому смыслу понятия «твердость» относится разработанный во второй половине 20 века **С.И.Булычевым, В.П. Алехиным, Ю.В.Мильманом** и другими авторами метод так называемой **кинетической твердости**, который применяли для исследования твердости в макро- и микродиапазонах

Сущность его заключается в определении твердости по диаграмме внедрения индентора в исследуемый материал, однако авторы оценивали твердость не семейством точек на нагрузочной кривой, а всего лишь одним значением, при определенной, предпочтительно максимальной, нагрузке индентирования.

Самое главное, что в этом методе твердость оценивается уже как с учетом упругой, так и пластической составляющих индентирования.

Несмотря на недостаток измерения твердости всего по 1 точке, идея авторов контролировать твердость не по восстановленному отпечатку, а по глубине внедрения индентора под нагрузкой, сыграла очень важную роль в дальнейшем развитии методов определения твердости и, особенно, современных методов определения нанотвердости материалов.

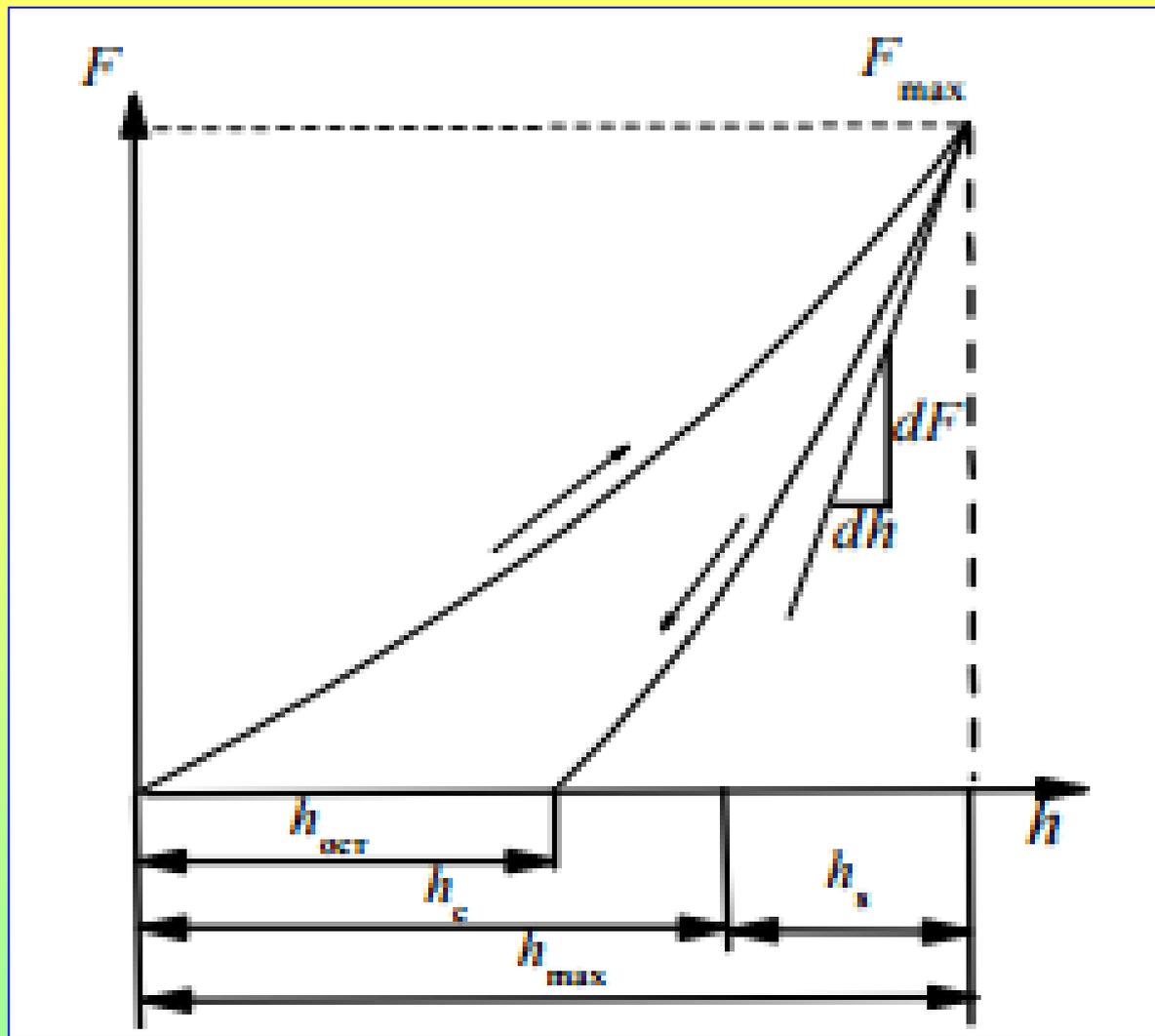


Схема диаграммы автоматического индентирования

## 2.10. Макро-, микро- и нанодиапазоны определения твердости

В основу идеи классификации методов было положено решение об их разделении по диапазонам в зависимости от применяемых нагрузок на индентор, и, соответственно, глубин его внедрения в исследуемый материал. В 2002 г. было закреплено в международном стандарте ISO 14577 следующее распределение методов определения твердости по диапазонам.

Распределение методов определения твердости по диапазонам

<b>Наименование диапазона</b>	<b>Величина применяемых нагрузок на индентор F, Н</b>	<b>Величина внедрения индентора в исследуемый материал h, мкм</b>
<b>Макродиапазон</b>	<b><math>2 \leq F \leq 30\ 000</math></b>	<b>не регламентировано</b>
<b>Микродиапазон</b>	<b><math>F &lt; 2</math></b>	<b><math>h &gt; 0,2</math></b>
<b>Нанодиапазон</b>	<b>не регламентировано</b>	<b><math>h \leq 0,2</math></b>

# Макро-, микро- и нанодиапазоны определения твердости

В **макродиапазон** попадают известные стандартизованные методы испытания по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу, в которых используются для расчета значений твердости параметры восстановленного отпечатка, т.е. фактически оценивается не твердость, а пластичность исследуемого металла.

К **микродиапазону** относятся методы, для реализации которых применяются нагрузки меньше 2 Н, а получающаяся глубина внедрения индентора при этом больше 0,2 мкм.

**Нанодиапазон** характеризуется любыми методами определения твердости, при которых глубина внедрения индентора не превышает 0,2 мкм.

Вышеуказанный стандарт ориентирован на определение твердости под нагрузкой и учитывает упругую и пластическую составляющие твердости при индентировании.

## 2.11. Определение макротвёрдости

Методы определения твердости в макро- и микродиапазонах ничем принципиально не отличаются и представляют собой отношение нагрузки к площади поверхности или проекции отпечатка.

**Макротвёрдостью** (также как и микро-, и нанотвёрдостью) **материалов называется способность материала сопротивляться внедрению в него более твердого тела – индентора.**

При этом согласно ISO 14577 при измерении макротвёрдости установлены следующие ограничения по

- нагрузке индентирования от 2 Н до 30 000 Н;
  - глубине внедрения индентора – не более 10% от толщины образца.
- В качестве инденторов рекомендуется использовать алмазную пирамиду Виккерса, алмазную пирамиду с трехгранным основанием, например, модифицированную пирамиду Берковича, шарики из твердого сплава или алмазные сферические инденторы, твердосплавные конусы.

## 2.12. Определение микротвёрдости

Согласно ISO 14577 при измерениях **микротвёрдости** установлены следующие ограничения по:

- нагрузке индентирования (до 2 Н);
- глубине внедрения индентора (свыше 200 нм, но не более при этом 10% от толщины образца (слоя));

- шероховатости поверхности (не более 20% от максимальной глубины внедрения индентора);
- специальной обработке поверхности для снятия наклепанного слоя.

В качестве инденторов рекомендуется использовать алмазную пирамиду Виккерса, алмазную пирамиду с трехгранным основанием, например, модифицированную пирамиду Берковича, шарик из твердого сплава или алмазный сферический индентор. Данный стандарт не запрещает использование и инденторов другой формы, однако при этом рекомендуется трактовать результаты измерений с осторожностью.

# **Задания для самостоятельной работы**

**1. В чём сущность метода определения твёрдости Родмана?**

**2. В чём сущность метода определения твёрдости Кальвера и Джонса?**

**3. В чём сущность методов определения твёрдости Бринелля, Виккерса и Роквелла?**

**4. Диапазоны определения твёрдости.**



# 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**

