



«Методы определения твёрдости и прочности материалов»

Лекция 3

**Классификация методов
оценки твердости.**

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

Содержание



3.1. Классификация методов оценки твердости в зависимости от показателя степени при глубине внедрения индентора



3.2. Методы определения твёрдости
базирующиеся на h^1



3.3. Методы определения твёрдости
базирующиеся на h^2



3.4. Методы определения твёрдости
базирующиеся на h^3



3.5. Твердость по Шору



3.6. Твёрдость по Барколу

Содержание



3.7. Диаграмма индентирования



3.8. Ползучесть



3.9. Работа индентирования

■

3.1. Классификация методов оценки твердости в зависимости от показателя степени при глубине внедрения индентора

Основные методы определения твердости материалов в зависимости от показателя степени при глубине внедрения индентора, условно можно разделить на 3 основные группы:

1) методы определения твердости, при расчете которой в формулах применяется h^1

$$H \approx f(h^1)$$

2) методы, в которых при расчете твердости в формулах используется h^2

$$H \approx f(h^2)$$

3) методы, в которых при расчете твердости используется h^3

$$H \approx f(h^3)$$

3.2. Методы определения твёрдости базирующиеся на h^1

В первую группу относят методы, позволяющие оценивать способность материала сопротивляться внедрению в него индентора.

Понятию «твёрдость» как способности материала сопротивляться внедрению более твёрдого тела — индентора,



в наибольшей степени соответствует метод определения твердости **по Шору**,

в котором регистрируется сила сопротивления внедрению индентора, протарированная в условных единицах обратно пропорционально глубине его внедрения .

Методы определения твёрдости базирующиеся на h^1

Описание методов определения твердости, базирующихся на h^1

Название метода	Описание метода
Диаграмма индентирования	Зависимость глубины внедрения индентора от нагрузки
Работа индентирования	Площадь под нагрузочной ветвью диаграммы индентирования
Твердость по Шору	Зависимость глубины внедрения индентора от максимальной нагрузки
Твердость по Роквеллу	Относительное изменение глубины внедрения индентора при предварительной и основной нагрузках в условных единицах
Ползучесть	Изменение глубины внедрения индентора под действием постоянной максимальной нагрузки в определенном интервале времени
Вязкоупругое восстановление отпечатка в процессе разгрузки	Изменение глубины внедрения индентора при разгрузке и выдержке в течение определенного времени

Метод Шора применим лишь для узкого диапазона материалов (резина, мягкие металлы и сплавы, пластмассы). В какой-то степени возможно оценить сопротивление материала внедрению индентора и по таким критериям, как: диаграмма индентирования; работа индентирования; ползучесть.

3.3. Методы определения твёрдости базирующиеся на h^2

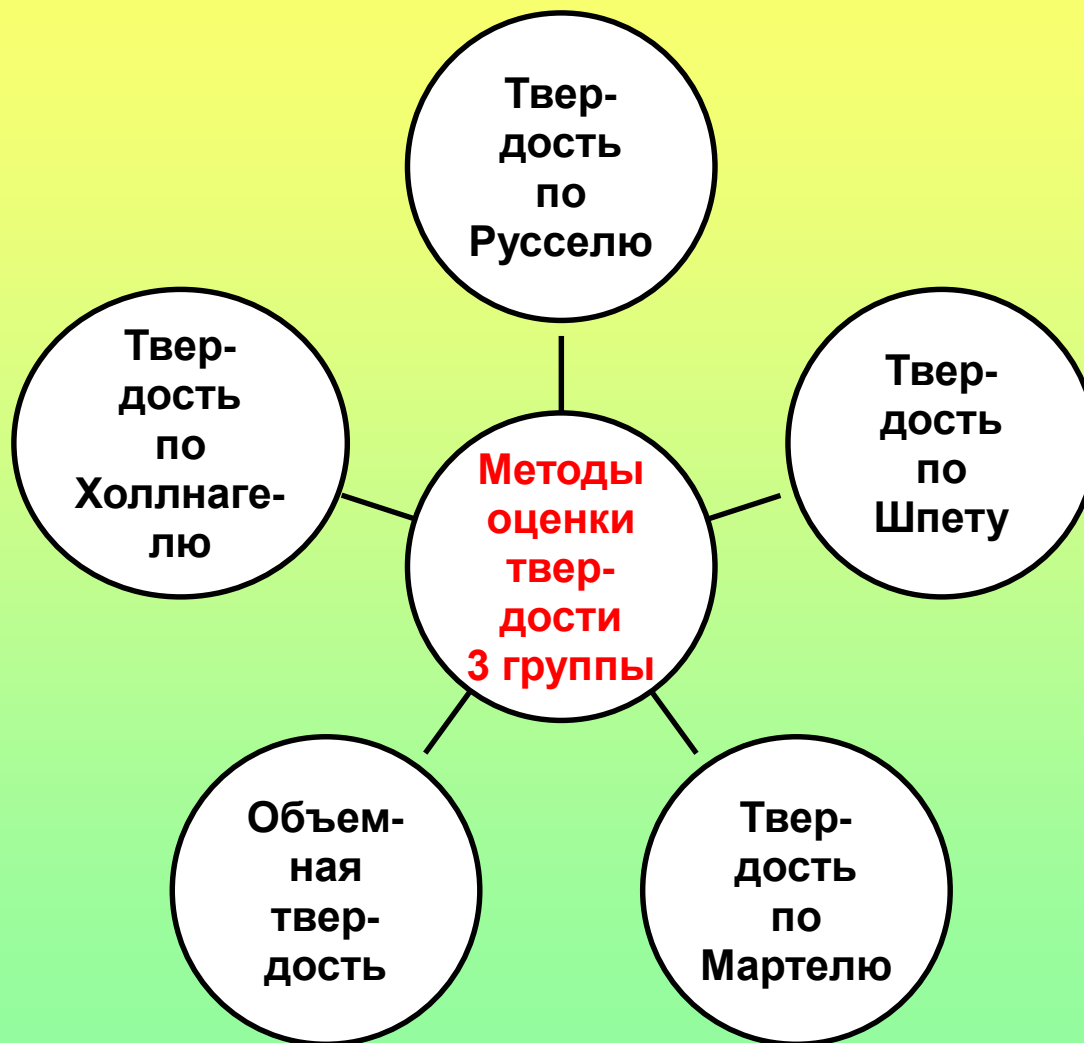


Описание методов определения твёрдости базирующиеся на h^2

Описание методов определения твердости, базирующихся на h^2 .

Название метода	Описание метода
Твердость по Бринеллю	Отношение нагрузки к площади поверхности сферического отпечатка
Твердость по Виккерсу	Отношение нагрузки к площади поверхности пирамидального отпечатка
Микротвердость по ГОСТ 9450–76	Отношение нагрузки, величиной до 2 Н, к площади поверхности пирамидального отпечатка
Твердость по Мейеру	Отношение нагрузки к площади проекции поверхности отпечатка
Твердость индентирования	Отношение максимальной нагрузки к площади проекции контакта индентора и материала
Среднее контактное давление	Отношение нагрузки к площади проекции контакта индентора и материала во всех точках нагрузочной ветви диаграммы индентирования
Твердость по Мартенсу	Отношение нагрузки к площади контакта индентора и материала в конкретных, оговоренных стандартом, точках нагрузочной ветви диаграммы индентирования
Поверхностная твердость	Отношение нагрузки к площади внедренной в материал части индентора во всех точках нагрузочной ветви диаграммы индентирования

3.4. Методы определения твёрдости базирующиеся на h^3



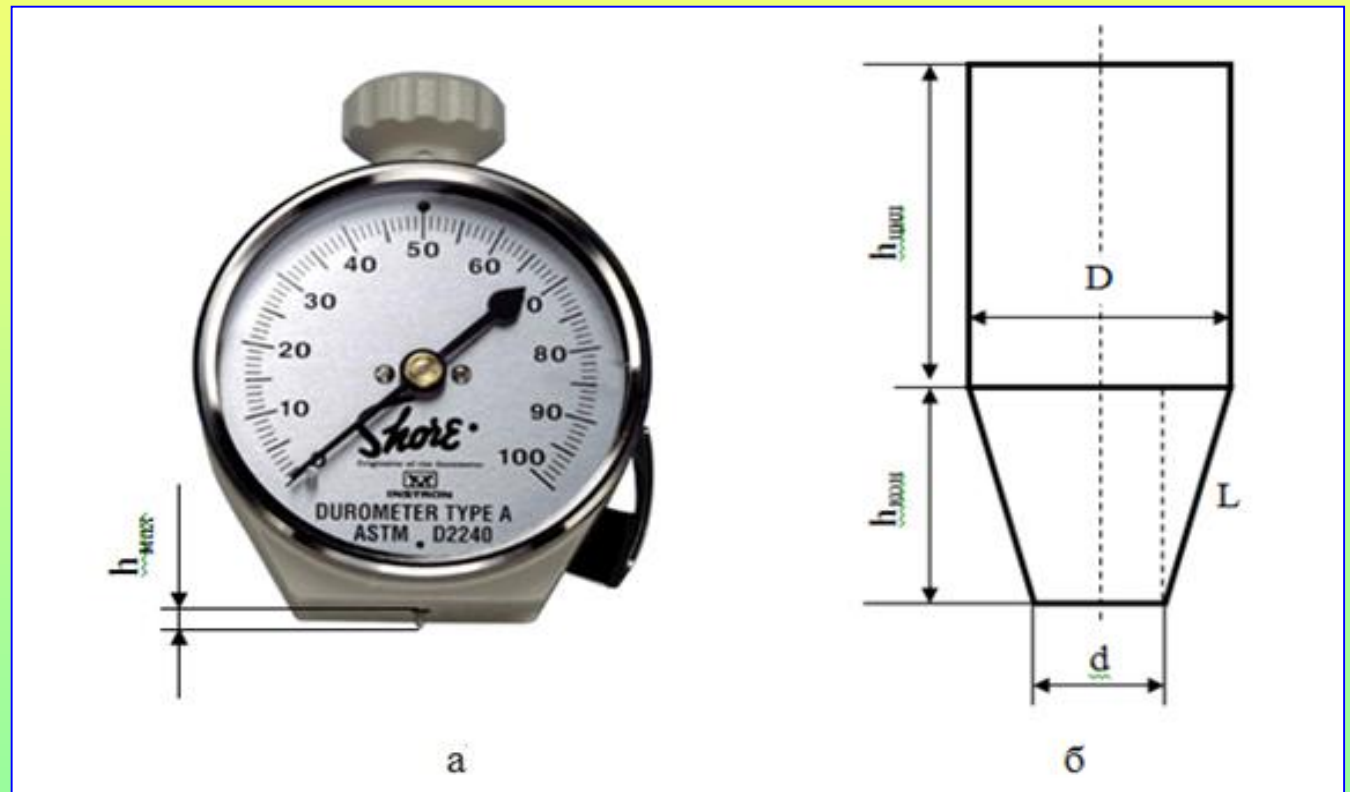
Описание методов определения твердости, базирующихся на h^3

Название метода	Описание метода
Твердость по Русселю, Холлнагелю	Отношение нагрузки к объему восстановленного отпечатка
Твердость по Шпету	Отношение нагрузки к произведению площади поверхности и глубины восстановленного отпечатка
Твердость по Мартелю	Отношение работы к объему восстановленного отпечатка
Объемная твердость	Отношение нагрузки к объему внедренной в материал части индентора во всех точках нагрузочной ветви диаграммы индентирования

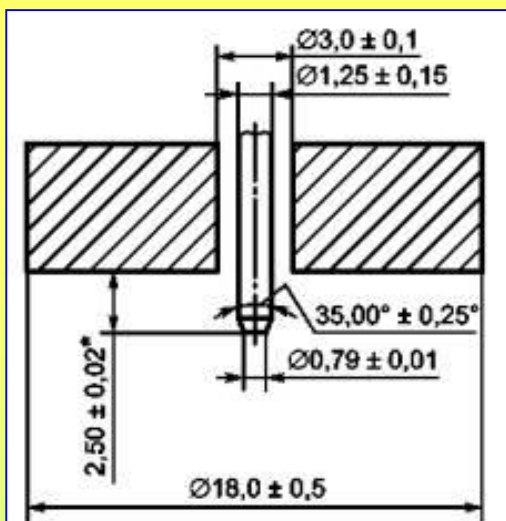
3.5. Твердость по Шору

Определение твердости в ее классическом понимании из всех известных до настоящего времени приборов обеспечивают твердомеры Шора и Баркола.

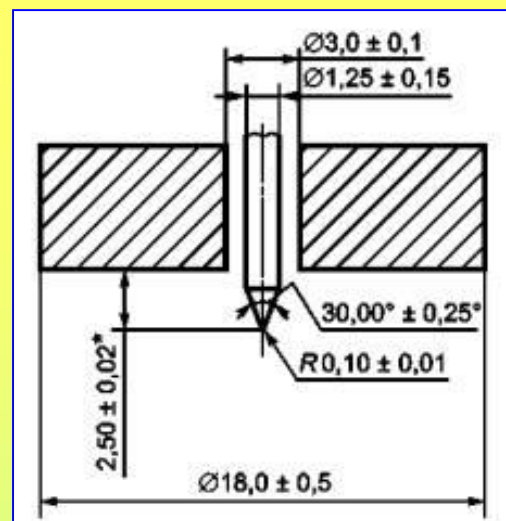
Внешний вид прибора и геометрия индентора для измерения твердости по методу Шора:



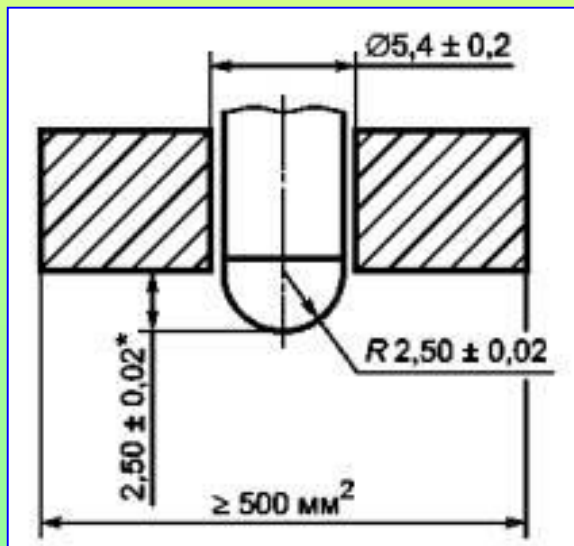
а – твердомер Шора (дюрометр); б – геометрические параметры индентора



Индентор для дюрометра типа А



Индентор для дюрометра типа D



Индентор для дюрометра типа A0

Твердость по Шору

Метод и шкала были предложены Альбертом Ф. Шором в 1920-х годах. Он же разработал соответствующий измерительный прибор, называемый дюрометром. Под твердостью по Шору понимается сила сопротивления материала вдавливанию наконечника определенной формы под действием силы давления пружины. Этот метод используется для измерения твердости таких материалов как: резины, пластмасса, эластомеры, каучуки и продуктов их вулканизации.

Твердость по Шору обозначается в виде числового значения шкалы, к которому приписывается буква, указывающая тип шкалы с явным указанием названия метода измерения твердости или прибора.

Например: **«Твердость по Шору 80А» «Твердость по Шору 50D».**

Чем больше число, тем выше твердость. Буква А определяет более мягкие значения, буква D - более твердые, причем области пересекаются.

Например, твердость полиуретанов указывается целыми числами от 0 до 100 с буквами А или D.

Твердость по Шору



Твёрдость по Шору материала протектора автомобильной шины составляет от 50А до 70А в зависимости от её назначения.

ШКАЛЫ ТВЁРДОСТИ ШОРА



Твердомеры Шора

Портативный твердомер
UIT TH-200



Измерение твердости резины, эбонита и мягких пластиков по шкале Шора А.

Твердомер модели
Elcometer 3120



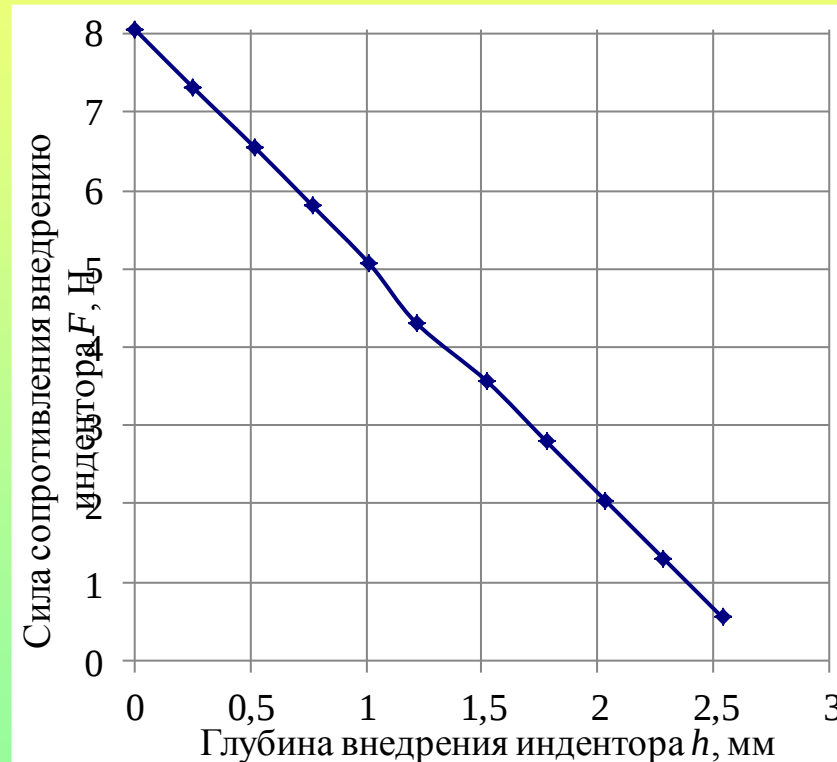
**Глубина
вдавливания**

Измеряется глубина вдавливания в материал определенного индентора под действием силы в заданных условиях.
Усилие создаётся калиброванной пружиной

Твердость по Шору

Несмотря на то, что твердомер Шора предназначен для измерения резины и резинотехнических изделий, он наглядно и точно соответствует определению понятия «твердость» материалов, т.е. способности сопротивляться внедрению более твердого тела – индентора.

Если в таком приборе заменить шкалу с единицами твердости на шкалу с силой сопротивления внедрению индентора,



то с его помощью можно в ручном режиме регистрировать полную диаграмму внедрения индентора.

Тарировочная диаграмма индентирования по методу Шора

Твердость по Шору

Стандартом ISO 7619 предусмотрены следующие максимальные нагрузки: 78 г (шкала М – микро) - 4533 г (шкалы С, D, D₀) .

Многообразие применяемых форм инденторов и широкий диапазон максимальных нагрузок на них,



ТВР-А твердомер (дюрометр) Шора тип А с аналоговым индикатором

предусмотренных ISO 7619, делают прибор Шора одним из самых простых и дешевых способов определения твердости, который соответствует классическому определению этого свойства.

Однако метод оценки твердости по Шору не предназначен для металлов и сплавов вследствие малых абсолютных величин нагрузки. Ограничением также является измерение твердости всего в одной точке диаграммы индентирования при определенной нагрузке и глубине внедрения индентора, которые зависят от свойств материала.

Твёрдость по Шору

Максимальный вылет индентора от базовой поверхности и, соответственно, максимальная глубина внедрения индентора в исследуемый материал может быть равна (для твердомера Шора) 2,54 мм согласно ISO 7619, шкала А.

Зафиксировав число единиц твердости по шкале прибора, можно по тарировочным кривым определить и глубину внедрения индентора и силу сопротивления его внедрению.



В зависимости от типа применяемой шкалы изготавливаются твердомеры с различной жесткостью пружины, передающей усилие на индентор.

Аналоговый твердомер Шора, установленный на штативе

Твердость по Шору А (твёрдомер с подставкой HZ-2512D)



Твердость по Барколу

Внешний вид прибора для измерения твердости по методу Баркола:

а – конструкция твердомера ХНАДУ (Баркол)



а



б

б – твердомер согласно ASTM D2583

3.6. Твёрдость по Барколу

Твердомер Баркола аналогичен по принципу действия твердомеру Шора, но позволяет измерять твердость не только резины и кожи, но и **более твердых материалов, таких как алюминий и алюминиевые сплавы, мягкие металлы, пластик.**

Твердомером Баркола можно измерять твердость материалов в диапазоне, аналогичном твердости по Бринеллю



– от 25 до 150 единиц, определяемых шариком Ø 10 мм при нагрузке 500 кгс.

Твердомер Elcometer 3101

Но по-прежнему остается **ограничение, связанное с измерением твердости всего в одной точке диаграммы индентирования при определенной нагрузке и глубине внедрения индентора, которые также зависят от свойств материала.**

Твёрдость по Барколу

Суть метода определения твердости мягких материалов по Барколу заключается в определении глубины вдавливания стальной иглы (индентор: усеченный конус с углом при вершине 26° и диаметром плоскости $0,157\text{ мм}$. Максимальный ход измерения: $0,76\text{ мм}$.) в исследуемую поверхность под действием пружины и сравнение ее с твердостью стандартной плиты.

Твердомер оснащен аналоговым глубиномером по которому можно сразу определить твердость по Барколу и при желании возможно перевести в твердость по Бринеллю, Роквеллу или Виккерсу.



Толщина испытываемых образцов материалов от 1 мм , расстояние от края образца до индентора не менее 3 мм .

Минимальная масса ТПБа (до $0,5\text{ кг}$), **габариты** (умещается в руке) и **мобильность** (в процессе испытания задействована одна рука, не требует источников питания) позволяют применять твердомер непосредственно на производственных линиях и в цехах.

Твёрдость по Барколу

Образец помещается под заостренный наконечник - индентор измерителя твердости Барокла и к образцу прикладывается равномерное давление до тех пор пока индикация шкалы не будет достигнута максимума, индентор проникает на определенную глубину в исследуемый материал, а стрелка установится на значении, которое соответствует твердости материала (от 0 до 100).



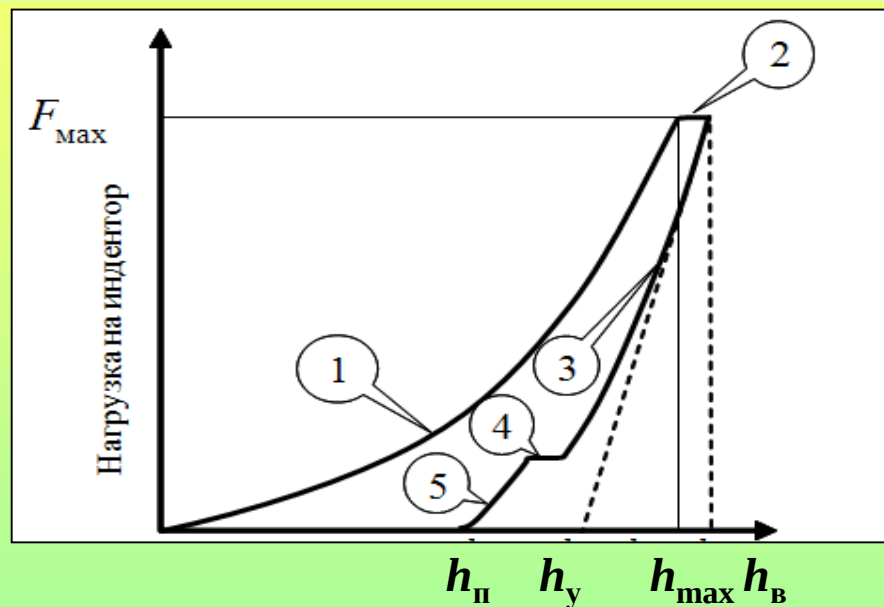
Каждому делению на шкале соответствует глубина проникновения 0,00762 сантиметра (0,003 дюйма). Глубина проникания преобразовывается в абсолютные значения по шкале индикатора.

3.7. Диаграмма индентирования

В связи с тем, что понятие «твердость» отражает способность материала сопротивляться внедрению индентора, одним из наиболее значимых методов ее оценки является **диаграмма $F-h$** , характеризующая кинетику процесса вдавливания индентора.

Типовые участки диаграммы индентирования:

- 1** – участок нагружения;
- 2** – выдержка при постоянной максимальной нагрузке;
- 3** – первичная разгрузка;
- 4** – выдержка при постоянной минимальной нагрузке (10–20 % от $F_{\max}$);
- 5** – окончательная разгрузка до нулевого значения;

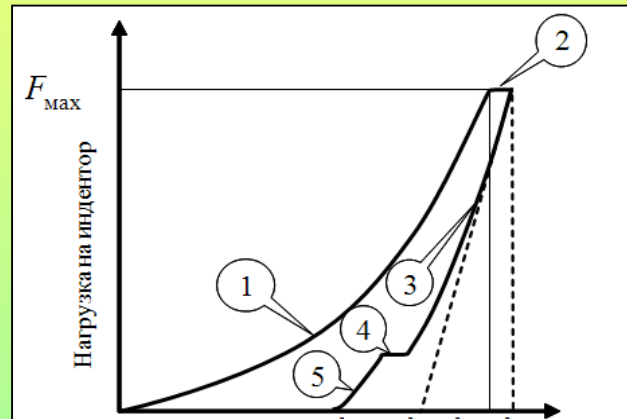


$h_{\text{п}}$ – глубина внедрения индентора после разгрузки; h_y – точка пересечения касательной к начальному участку разгрузочной кривой с осью глубины внедрения индентора; h_{max} – глубина внедрения индентора, соответствующая началу выдержки при максимальной нагрузке; $h_{\text{в}}$ – глубина внедрения индентора, отвечающая концу выдержки при максимальной нагрузке

Диаграмма индентирования

Диаграмма индентирования показывает перемещение индентора от поверхности вглубь исследуемого образца под влиянием приложенной к индентору нагрузки. Наличие нескольких криволинейных участков на диаграмме требует различного подхода к выражению их математическими зависимостями.

Участок нагружения 1 обычно описывают степенной функцией, получившей название уравнения Мейера, или **полиномом второго порядка**.



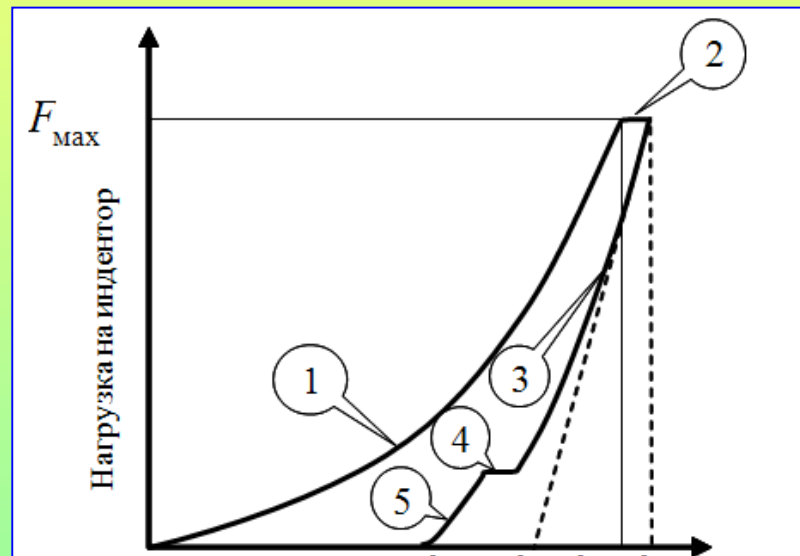
Графическое дифференцирование **участка разгрузки 3** используют для вычисления **жесткости измерительной системы**.

По **участкам 2 и 4** определяют **ползучесть и вязкоупругое восстановление**, соответственно. Наибольший научный и практический интерес представляет **участок нагружения 1**, поскольку именно он показывает сопротивление материала углублению индентора.

Диаграмма индентирования

При исследованиях твердости неоднородных по структуре и свойствам материалов надо иметь ввиду, что для них участок нагружения 1 будет характеризоваться семейством кривых индентирования с определенным диапазоном разброса, который особенно сильно проявляется при микро- и наноиндентировании.

Твердость неоднородного материала характеризуется не одним числом,



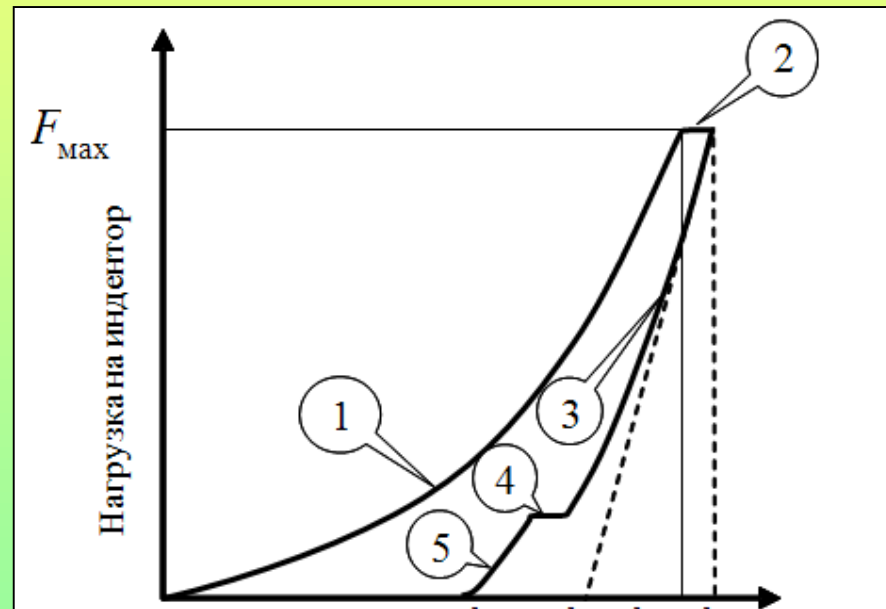
а кривой, и к тому же семейством разброса кривых индентирования.

Естественно, такие кривые будут отличаться и в зависимости от формы индентора.

Диаграмма индентирования

В несколько меньшей степени отражают сопротивление материала внедрению индентора участки 2 и 4 диаграммы индентирования. Используя **участок 2**, можно получить такую важнейшую характеристику материалов, как ползучесть при индентировании, которая показывает изменение глубины внедрения индентора во времени при постоянной нагрузке.

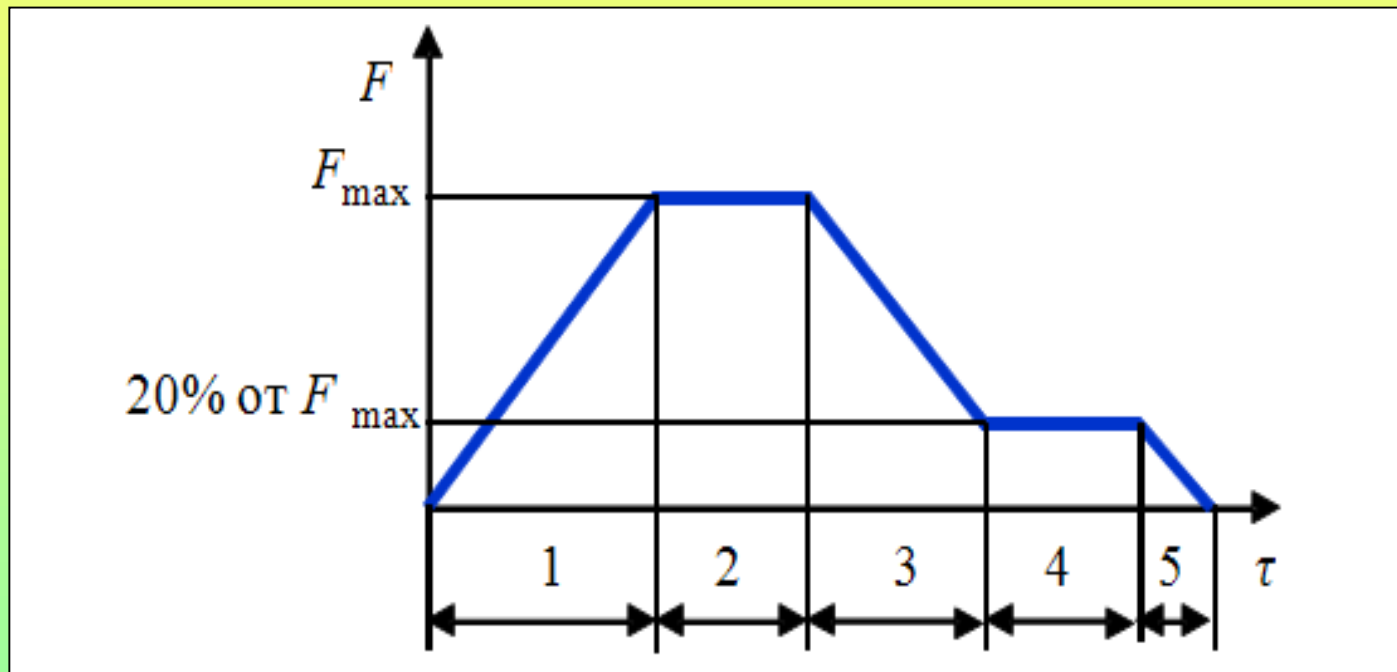
Участок 4 отвечает вязкоупругому восстановлению отпечатка после снятия основной нагрузки.



Именно в одной точке этого участка и предложил С. П. Роквелл оценивать твердость металлов и сплавов.

Диаграмма индентирования

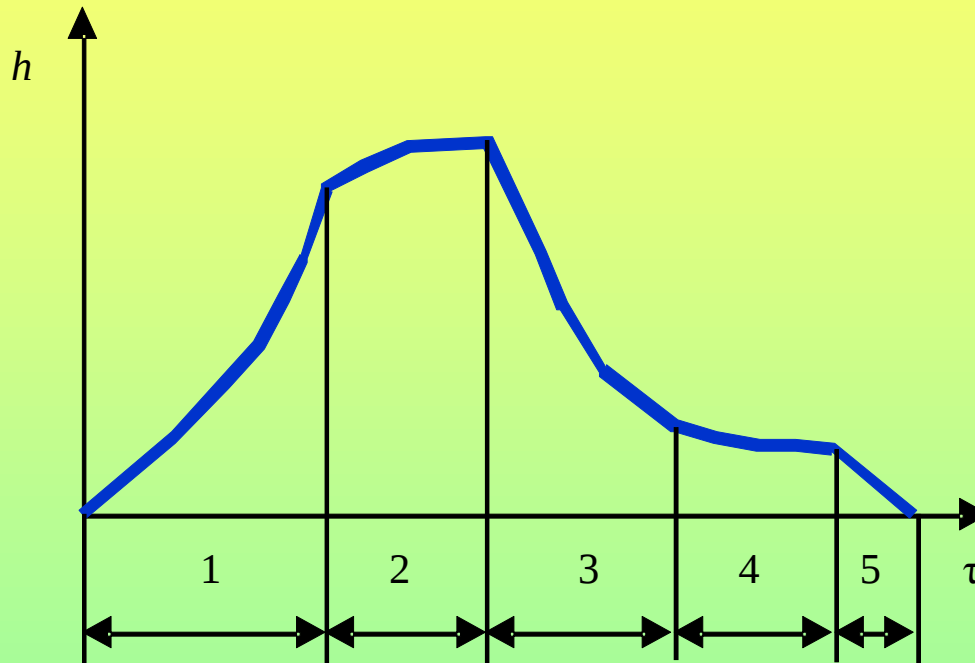
Каждому участку (1–5) диаграммы индентирования должна строго соответствовать кинетика внедрения индентора, которая описывается схемой



Кинетика изменения нагрузки на индентор на каждом типовом участке диаграммы индентирования, задаваемая прибором

Диаграмма индентирования

Кинетика изменения глубины внедрения индентора примерно описывается схемой

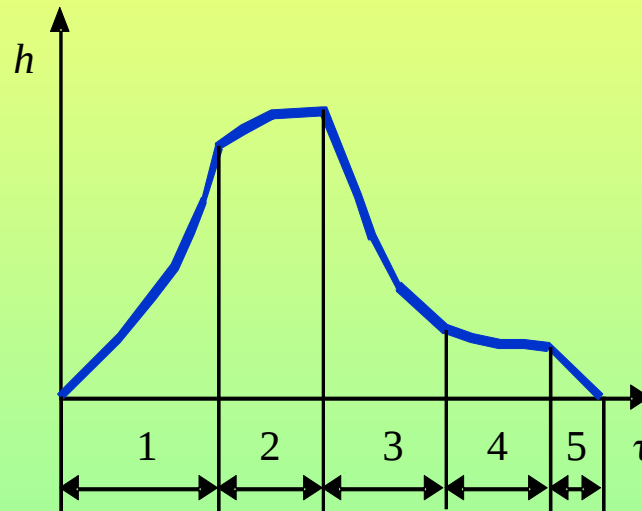


Кинетика изменения глубины внедрения индентора в исследуемый материал на каждом типовом участке диаграммы индентирования, определяемая способностью материала сопротивляться внедрению индентора

Диаграмма индентирования

Как следует из этих рисунков, если нагрузка на индентор задается прямолинейной зависимостью во времени на разных этапах нагружения и разгрузки, то получаемая глубина внедрения индентора имеет криволинейные участки на всех этапах диаграммы.

И именно по глубине внедрения индентора, определяемой в данном случае свойствами исследуемого материала, можно судить о характере сопротивления материала внедрению индентора.



Способности материала сопротивляться внедрению индентора соответствует именно кинетика изменения глубины внедрения индентора.

Кинетика изменения глубины внедрения индентора – это характеристика именно сопротивления материала внедрению индентора.

Диаграмма индентирования

Характер изменения кривой 1 индентирования в процессе нагружения описывает зависимость нагрузки от диаметра отпечатка **Мейера**:

$$P = ad^n \quad (1)$$

где a , n – константы, зависящие от формы применяемого индентора и свойств материала; d – диаметр отпечатка.

Зависимость, аналогичную (1), но уже для глубины восстановленного отпечатка, В. К. Григорович, С.И. Булычев, В.П. Алехин предлагают выразить следующим уравнением

$$P = a_1 h^n,$$

где a_1 , n – константы, зависящие от формы применяемого индентора и свойств материала; h – глубина отпечатка.

В то же время Матсумура еще в 1932 г. при определении твердости шариковым индентором, диаметром 4 мм, экспериментально установил, что зависимость глубины отпечатка от нагрузки представляет собой полином 2 порядка

$$P = a_1 h + bh^2$$

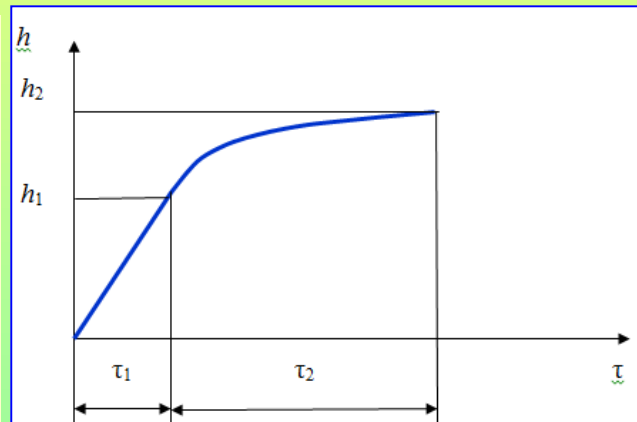
На этот факт почти не обратили внимания, и в дальнейшем все оперировали формулой, получившей название закона Мейера.

3.8. Ползучесть

Ползучесть материала – это изменение деформации при постоянной нагрузке. Ползучесть при индентировании представляет собой относительное изменение глубины внедрения индентора при постоянной (преимущественно максимальной) нагрузке и определяется следующим образом

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} 100$$

где h_1 – глубина внедрения индентора в момент достижения нагрузкой своего заданного, как правило, максимального значения;



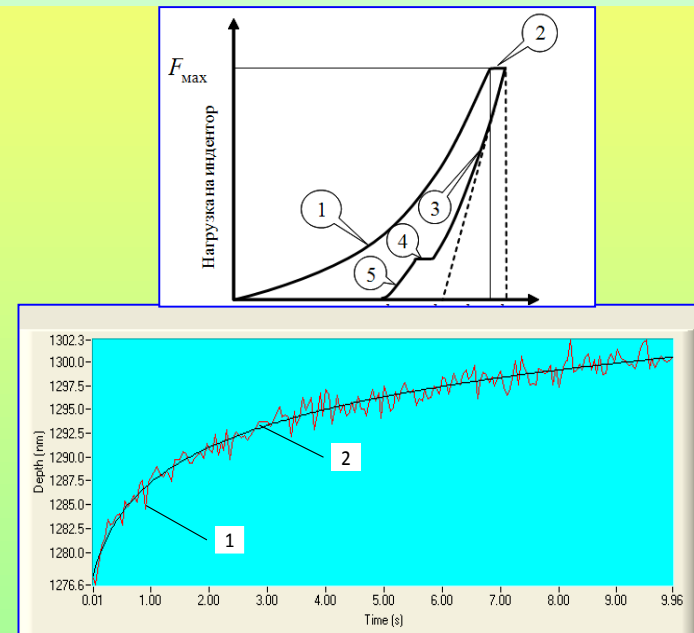
h_2 –глубина внедрения индентора за время выдержки при постоянной, как правило, максимальной нагрузке индентирования.

Схема определения ползучести материалов при индентировании: τ_1 – время нагружения до достижения максимальной нагрузки; τ_2 – период ползучести

Ползучесть

Изменение кривой индентирования при выдержке под постоянной нагрузкой характеризует такое важнейшее свойство материалов, как ползучесть.

Участок 2 диаграммы индентирования представляет собой зависимость глубины внедрения индентора от времени выдержки под постоянной нагрузкой и обычно имеет вид, представленный на рисунке.



Типовая зависимость глубины внедрения индентора от времени выдержки под постоянной, максимальной нагрузкой индентирования:

- 1 – глубина внедрения индентора Берковича в образцовую меру твердости 103HV при постоянной нагрузке 155,22 мН и выдержке в течение 10 с;
- 2 – тренд этих же значений

3.9. Работа индентирования

Одним из новых и недостаточно исследованных критериев оценки твердости является работа индентирования, которая определяется по формуле

$$W_{\text{общ}} = \int_0^h F dh$$

где F – нагрузка индентирования;
 h – глубина внедрения индентора.



Соотношение между пластической и упругой деформациями при индентировании

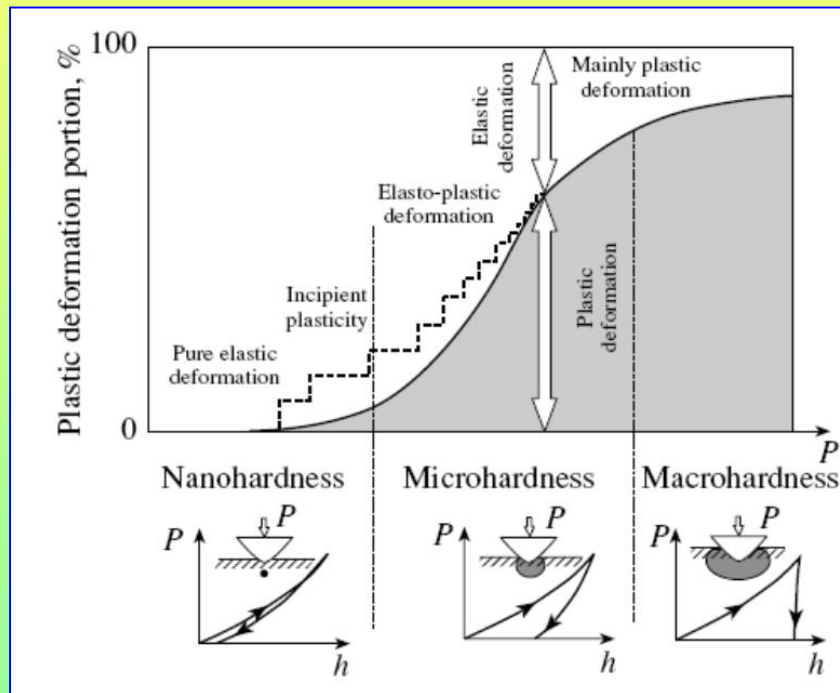
Общая работа индентирования, затраченная на процесс внедрения индентора в исследуемый материал, состоит из работы, расходуемой на упругую и пластическую деформации материала.

Работа, затрачиваемая на упругую деформацию, исчезает после снятия нагрузки. Соотношение между пластической и упругой деформациями при индентировании представлено на рисунке.

Работа индентирования

При такой огромной упругой деформации в области малых h доля пластической деформации ничтожно мала и **отпечатка не наблюдается**, поэтому метод оценки твердости по восстановленному отпечатку здесь не работает.

Если проанализировать соотношение упругой и пластической деформации по размерным диапазонам измерения твердости,



то это соотношение выглядит следующим образом:

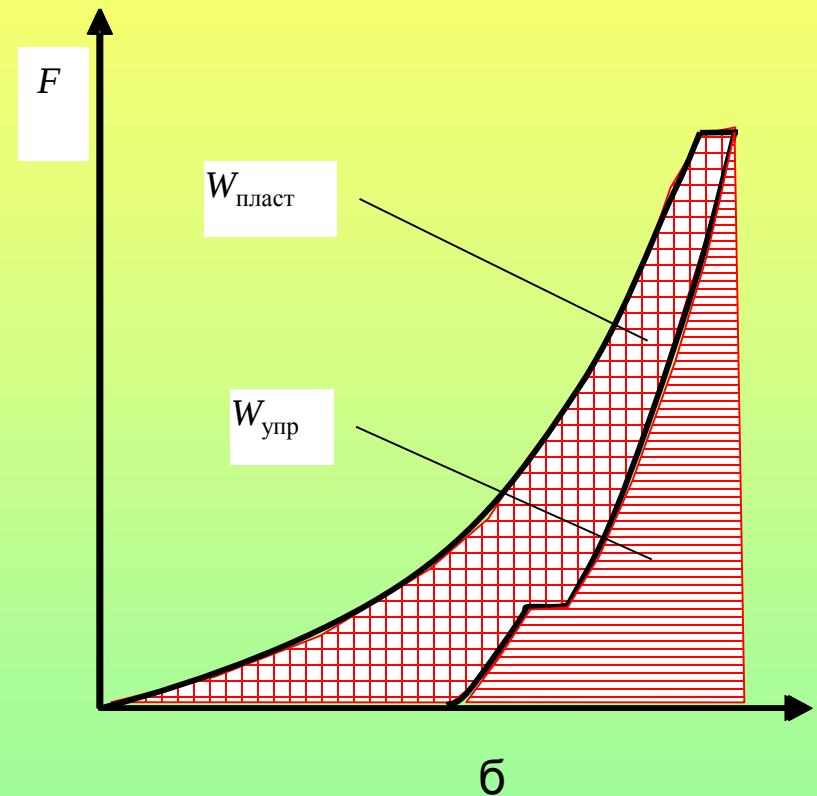
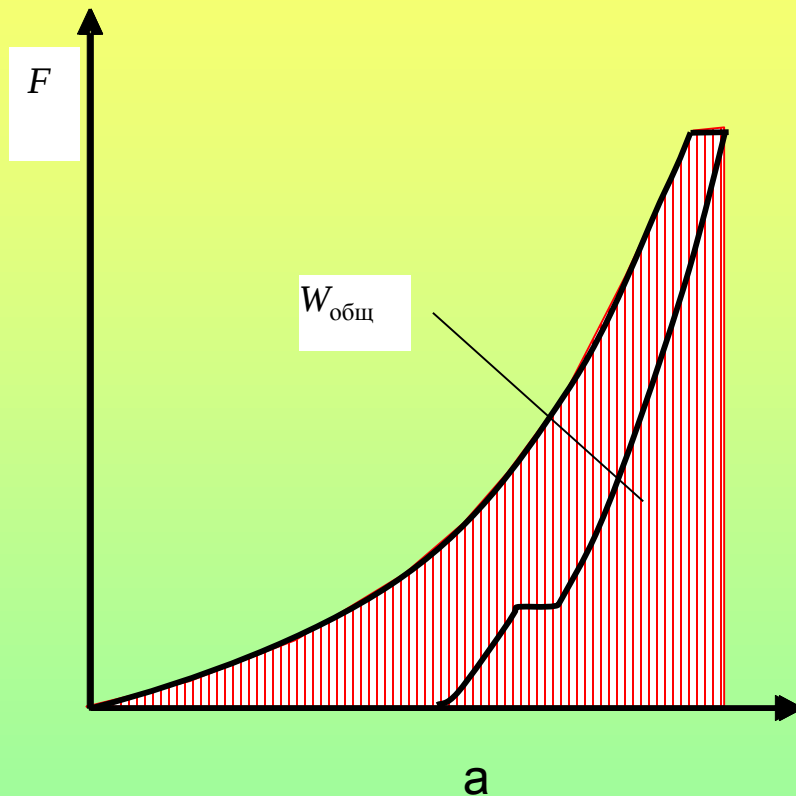
$$W_{\text{общ}} = W_{\text{упр}} + W_{\text{пласт}}$$

где $W_{\text{упр}}$ – упругая часть общей работы; $W_{\text{пласт}}$ – пластическая часть общей работы индентирования.

Соотношение между пластической и упругой деформациями при индентировании в зависимости от диапазона измерения твердости

Работа индентирования

Графически общая работа индентирования представлена на рисунке.



Общая работа индентирования (а), упругая и пластическая (б) составляющие

Работа индентирования

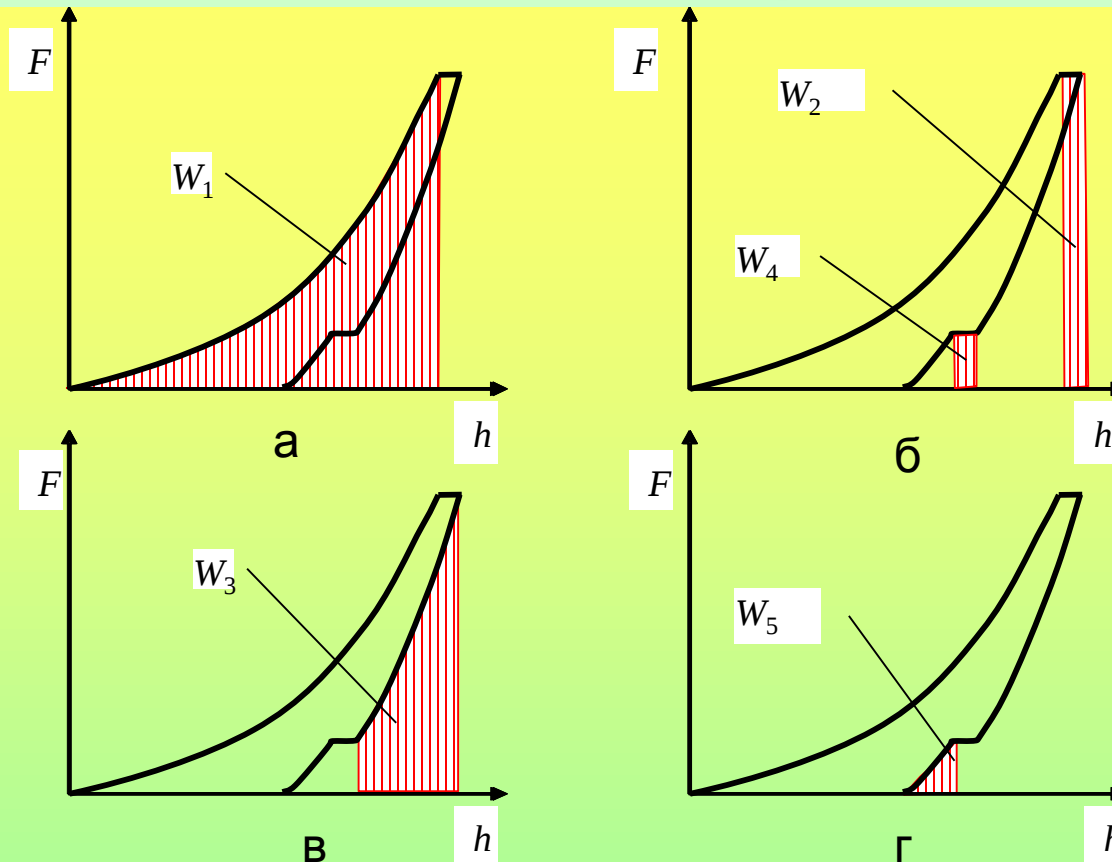


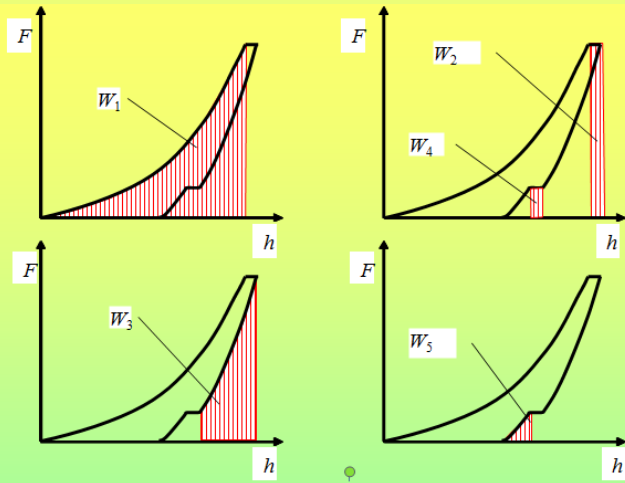
Схема разложения общей работы индентирования на составляющие: а – W_1 – работа индентирования; б – W_2 – работа индентирования при выдержке под постоянной нагрузкой; W_4 – работа вязкоупругого восстановления отпечатка при выдержке в процессе разгрузки с нагрузкой, равной 10 % от максимальной нагрузки индентирования; в – W_3 – основная часть упругой составляющей работы индентирования; г – W_5 – дополнительная часть упругой составляющей работы индентирования

Работа индентирования

Пластическая составляющая работы индентирования будет равна

$$W_{\text{пласт}} = W_1 + W_2 - W_3 - W_4 - W_5$$

Численно значения составляющих работы индентирования можно получить, определив площадь, ограничиваемую каждым участком диаграммы индентирования и осью абсцисс.



При этом полную величину работы, затраченную на вытеснение материала индентором, можно использовать для определения механических свойств новых материалов с различными типами структурного состояния.

Между работой, затрачиваемой на деформацию, и вытесненным объемом существует такая же взаимосвязь, как при определении твёрдости материалов. Поскольку международным стандартом ISO 14577 подобная методика не регламентирована, то необходимы дальнейшие исследования по использованию работы индентирования для оценки твердости материалов.

Задания для самостоятельной работы

1. На какие группы делятся методы определения твёрдости в зависимости от показателя степени при глубине внедрения индентора?

2. В чём сущность метода определения твёрдости по Шору?

3. В чём сущность методов определения твёрдости по Барколу?

4. Назовите типовые участки диаграммы индентирования.

5. Из каких составляющих состоит работа индентирования?



Кафедра технології металлов и матеріалознавства

Лалазарова Наталія Алексеевна

E-mail: lalaz1991@mail.ru

г. Харків, ул. Петровського, 25, ХНАДУ, КАФЕДРА ТМ и М

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

