

# 1. Свойства параметров кинетического индентирования в расчетах эмпирического числа твердости, неоднозначность, размерный эффект.

Определение числа твердости конструкционных материалов можно условно характеризовать двумя методами механического или кинетического индентирования Рис.1. Другие методы оценки твердости здесь не рассматриваем. Единого признанного, физически обоснованного метода определения числа твердости нет [1,2]. Твердость материала является по существу эмпирическим числом. В общем случае величину эмпирической механической твердости можно представить отношением усилия на индентор  $F$ , деленного на величину некоторой площади  $S$  контакта индентора с материалом, (1).

$$H = F/S \quad (1)$$

$$HI(h) = F(h)/S(h) \quad (1.1).$$

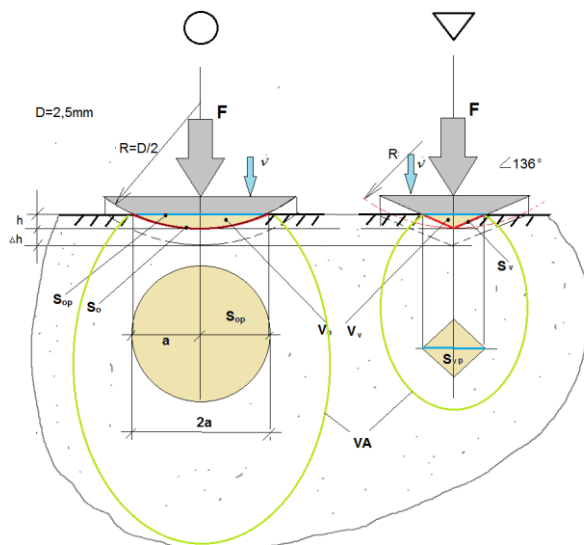
$$HIv(h) = F(h)/Va(h) \quad (1.2).$$

Где,  $H$  - механическая твердость материала. Стандарт ISO 14577 твердость обозначена  $HM$  – число Мартенса.

$HI(h)$  – функция поверхностной кинетической твердости (1.1);

$HIv(h)$  – функция объемной кинетической твердости (1.2).

$F(h)$ ,  $N$  – усилие на индентор;  $h$ ,  $m$  – глубина перемещения индентора.



**Рис.1.** Схема процесса простого механического и кинетического индентирования. Геометрические параметры процесса для сферы Бринелля и пирамиды Виккерса. В одном масштабе контактная  $S$  и проекционная  $S_p$  площади. Условный объем активации -  $V_a$ . Обозначения:  $S_o$ ,  $S_{op}$ ,  $V_o$  – сфера;  $S_v$ ,  $S_{vp}$ ,  $V_v$  – пирамида.

Обозначим параметры:

$S_A$ ,  $m^2$  – условная геометрическая площадь контакта, в стандарте ISO 14577 [3] называется площадь рабочей части индентора.

$V_a(h)$  - условная геометрическая величина вытесненного объема материала,

$S_o, m^2$  – площадь контактной поверхности активированного объема индентором сфера.

$S_v, m^2$  – площадь контактной поверхности активированного объема индентором пирамида.

Размеры  $h, S, V$  условно показаны в метрах. По величине глубины  $h$  различают три диапазона индентирования: нано, микро, макро.

Характерный вид функции усилия  $F(h)$  от перемещения на Рис.2. Объемная твердость вместо площади в числителе использует величину  $Va(h)$  вытесненного объема материала (1.2) [1].

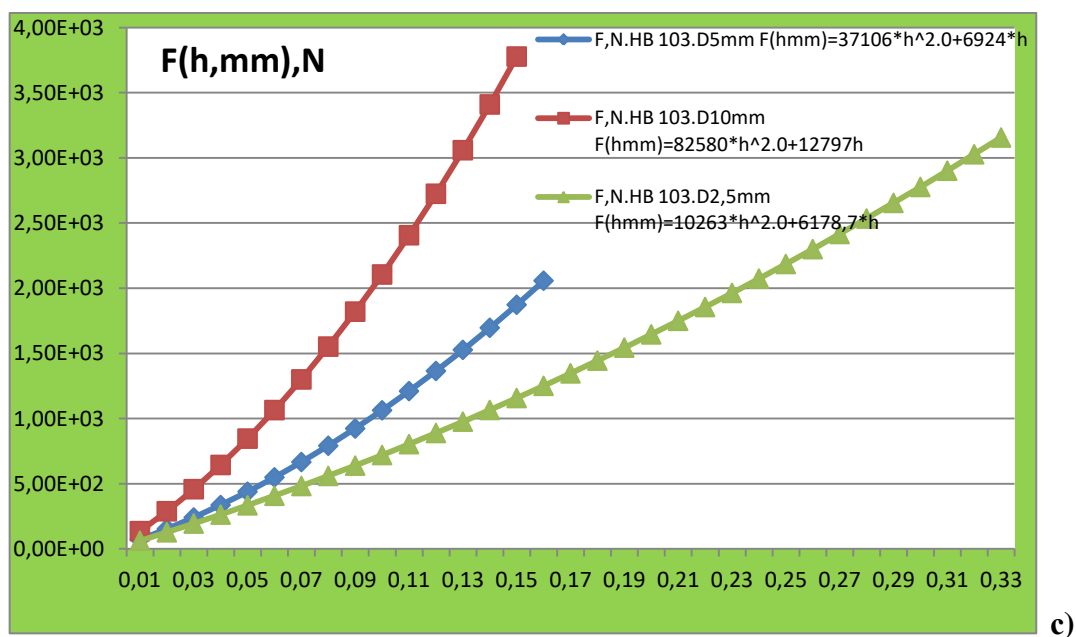
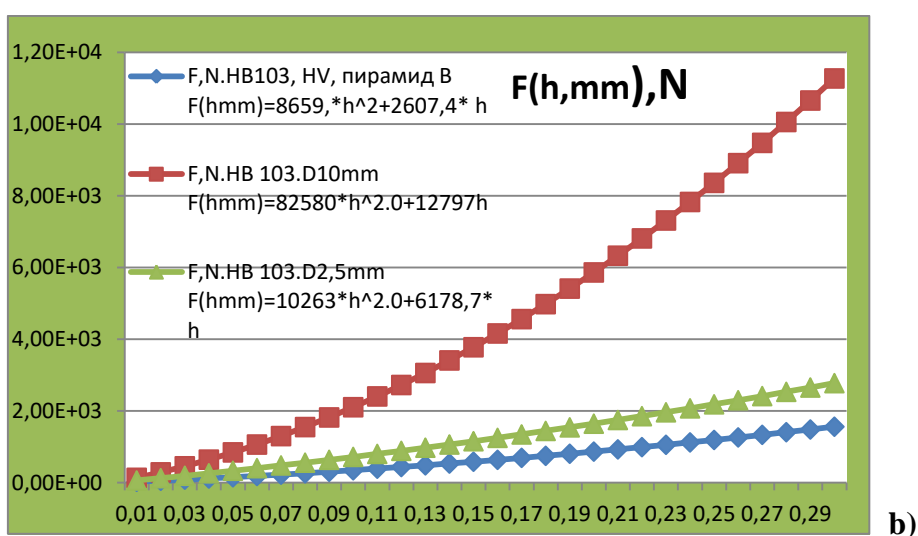
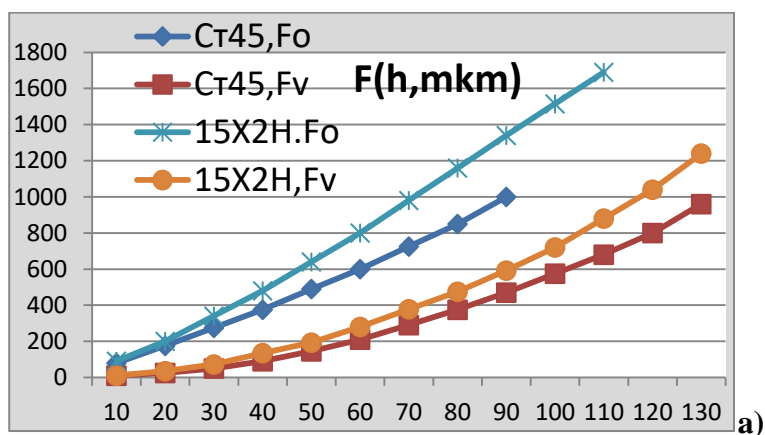
На Рис.1 показана условная граница области VA, внутри её происходит активация необратимых разрушительных, деформационных процессов. За её пределами справедлив принцип Барре де Сен – Венана [4], применимы понятия обратимые процессы, упругие напряжения. Внутри области VA находится геометрический условный объем  $V_0$  (для сферы) и  $V_v$  (для пирамиды), приближенно равный объему погруженной части индентора. Так же внутри области VA расположен физический активированный объем  $V_{op}$  и  $V_{vp}$  соответственно индентору. Физический объем наделен высокой плотностью энергии (границы не показаны), шаровым тензором высоких напряжений, в нем идут необратимые процессы разрушения структурных свойств, прочности материала. В терминах обычной механики деформированного твердого тела (далее ДТТ), внутри VA присутствует макроскопическая область активного разрушения «атомных связей» материала, зависящая от формы и перемещения индентора, твердости и др.

В механическом методе индентирования выбирают значение максимального усилия  $F$  и ему соответствующую величину условной площадки  $S$ , затем вычисляется  $H$  (1.1). Выбор максимального усилия  $F$ , для расчета твердости, производится эмпирическим методом. Значение площади условного контакта  $S$  определено формулой конкретного метода индентирования. В некоторых случаях площадь измеряется после снятия усилия.

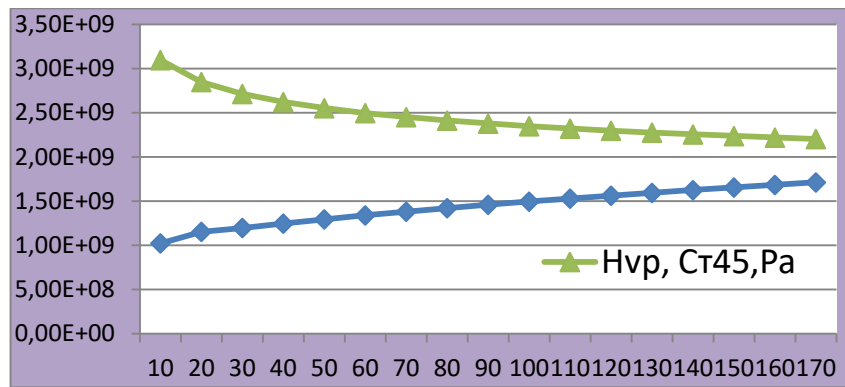
В кинетическом методе ISO 14577 число твердости материала НМ определяется по Мартенсу. Стандарт предусматривает построение функции  $HI(h)$ , Рис. 3. Выбор величины усилия  $F$ , в кинетическом методе измерения поверхностной или объемной твердости, носит так же неоднозначный характер. Изначально отсутствует единое физическое толкование исследуемого процесса, нет алгоритма и критерия измерения твердости. Число твердости  $H$ , в некоторых случаях обозначают напряжением, но это не корректное использование термина теории упругости. Эмпирический подход, в силу отсутствия физического критерия, способствовал появлению разных методов и стандартов индентирования. Различные инструменты сфера, конус, пирамида и др., разные размеры инструмента показывают различные числа твердости для одного материала, различия имеют существенный характер. Эти различия минимизируют эмпирическим путем.

НМ твердость зависит от нагрузки на индентор. Такое свойство получило название размерного эффекта (indentation size effect). На зависимость твердости от нагрузки влияет форма индентора. Однако строгой связи нет. Для сферического индентора с увеличением нагрузки твердость увеличивается — обратный размерный эффект (reverse indentation size effect); для индентора в виде пирамиды Виккерса или Берковича с увеличением нагрузки твердость уменьшается — прямой или просто

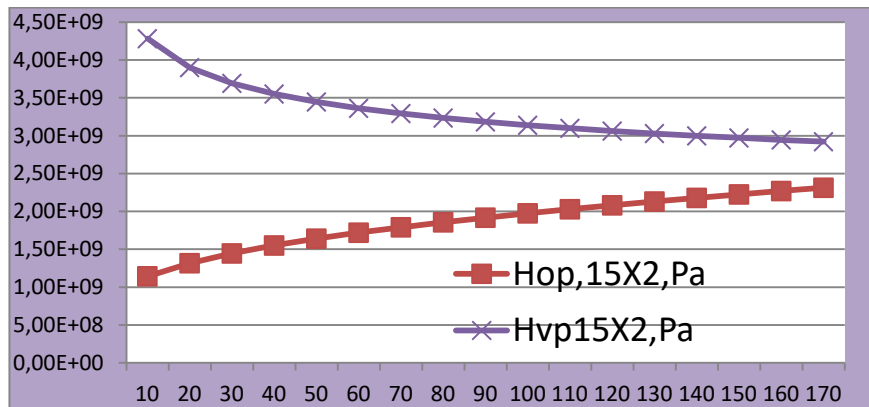
размерный эффект (indentation size effect); для сфероконического индентора возникают смешанные эффекты.



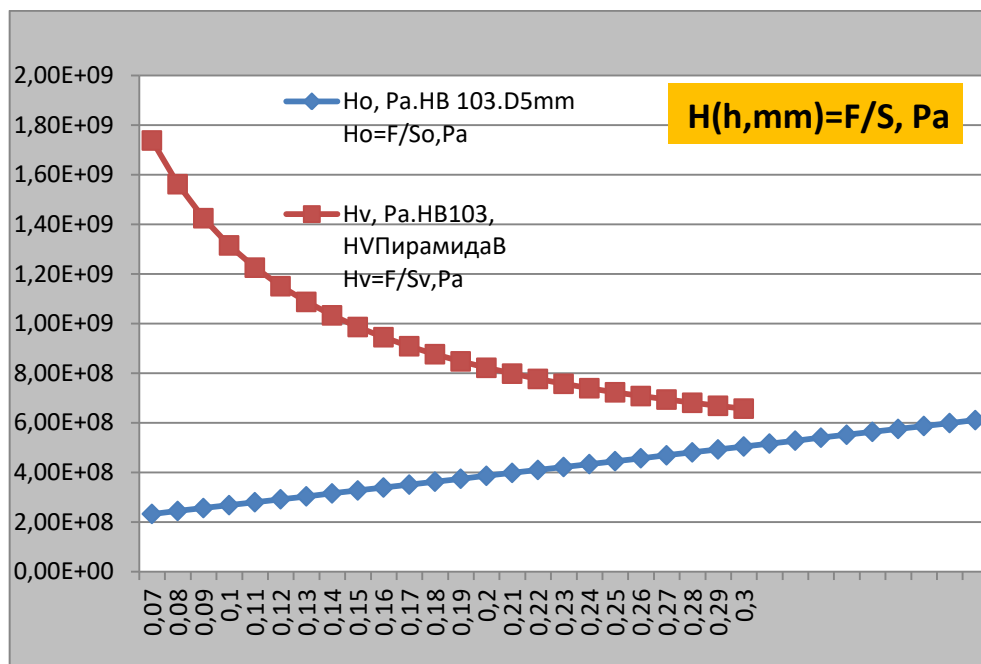
**Рис.2. а)** Зависимость усилия индентирования  $F(h), \text{N}$  от  $h, \text{mkm}$ ;  $F_o$  – сфера,  $F_v$  – пирамида Виккерса [5].  
**б)** Зависимость  $F(h), \text{N}$  от  $h, \text{mm}$ ; сфера D2,5/10mm, пирамида Виккерса. **в)**  $F(h, \text{mm}), \text{N}$ , данные экспериментов на образцовой мере 103HB, аппроксимация полиномом, D2,5; 5;10 mm. Данные [1].



А



В



с)

**Рис.3.А.В.** Кинетическая твердость  $HI(h) = F(h)/S(h)$ . А). сталь 45;  $Hор(h)$ ,  $Hvp(h)$ . В). сталь 15XН2,  $Hор(h)$ ,  $Hvp(h)$ , С) мера твердости HB103, данные [1]. Индекс  $p$ , согласно (1.1), обозначает проекционную площадь  $S_p$ .

Из анализа различных источников и обобщения значительного объема экспериментальных данных предоставленных профессором В.И. Мощенок ХНАДУ, очевидна неоднозначность в определении числа твердости. В методах механического индентирования нет физической меры, критерия однозначного определения состояния материала, при котором возникают физические условия для измерения твердости. В

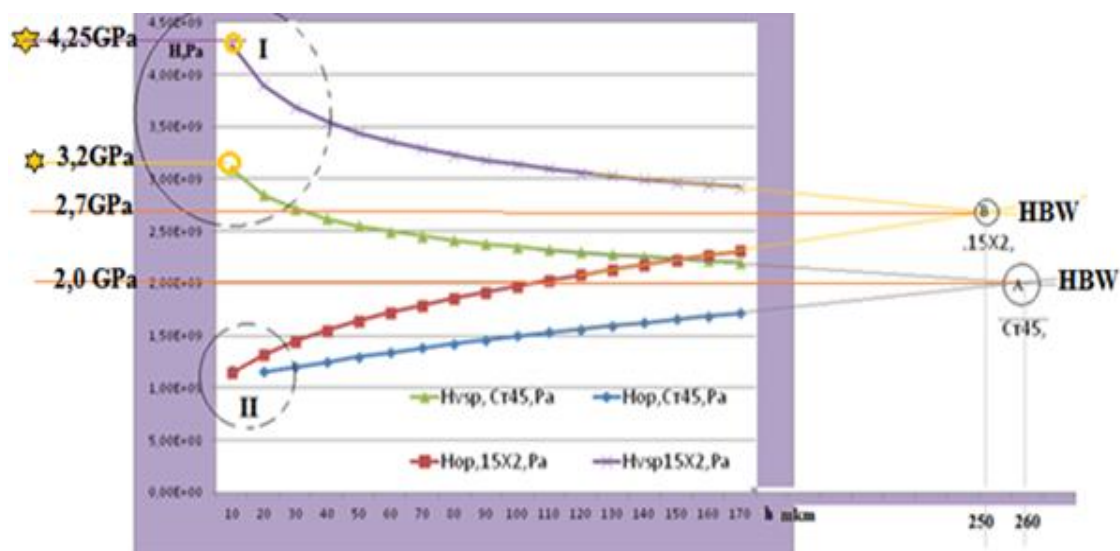
качестве критерия априори назначаются усилие или некоторый условный геометрический параметр. В этих условиях исторически возникли различные методы индентирования: поверхностные и объемные, макро, микро, нано и др. Для измерения твёрдости существует несколько шкал, приспособленных к разным методам измерения (Бринелля, Роквелла, Виккерса, Шора и др.). Корректное сравнение показателей твердости полученных разным методом проблематично. Физически обоснованных принципов сравнения, критерия подобия нет, по этой причине нет возможности корректно сравнить числа твердости полученные разным методом. Это свойство отмечено в монографии посвященной индентированию [1]. Для сопоставления чисел твердости полученных в разных условиях или методах используют таблицы, методики пересчета твердости, стандарт ASTM E140–07 и др. Перечисленные способы сравнения разных чисел твердости приближенные и имеют ограниченный характер применения.

Кинетическое индентирование, в сравнении с механическим одноактным определением твердости, высоко информативный метод определения свойств материала. Стандарт ISO 14577-1:2002 [3] определяет: работу процесса индентирования, модуль упругости EIT, ползучесть при индентировании CIT, релаксацию при индентировании RIT, пластическую и упругую составляющие работы индентирования.

Рассмотрим кратко результаты анализа кинетического индентирования, полученные на конструкционных материалах и специальных мерах твердости. Обсудим особенности процесса индентирования, возможные причины размерного эффекта и др.

Рассмотрим свойства геометрических параметров индентирования для сферы и пирамиды. На Рис.2 показаны зависимости усилия  $F(h)$  от перемещения индентора  $h$ , для кинетического индентирования, сферой D2,5mm, и пирамидой Виккерса, сталь 45 и 15XН2 [5]. Расчеты выполнены по диаграммам кинетического индентирования, полученным на установке UTM – 20НТ (ИПП НАН Украины), на конструкционных материалах сталь 15X2НМФА, Сталь45. На Рис.3 диаграммы кинетической твердости этих сталей, индентор сфера - **Нор**, пирамида - **Hvsp**. Твердость посчитана по (1.1), в расчетах принята условная проекционная площадь контакта, на рисунке размерность площади контакта -  $m^2$ , **Sop(h)** – сфера, **Svp(h)** – пирамида Виккерса.

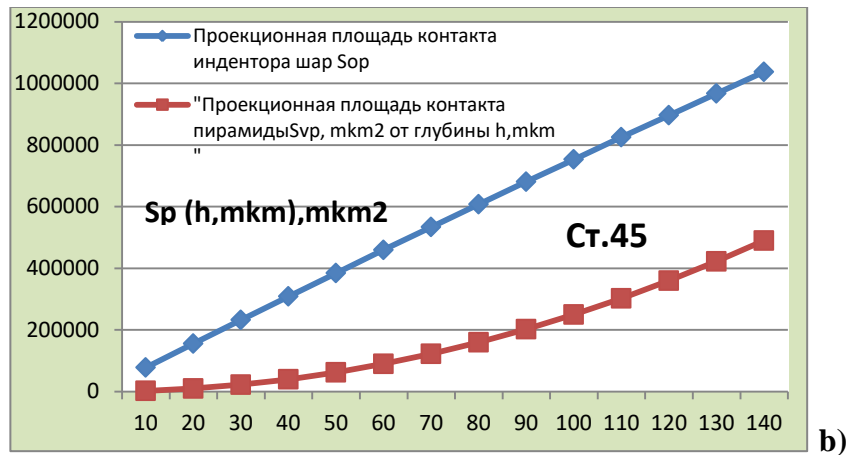
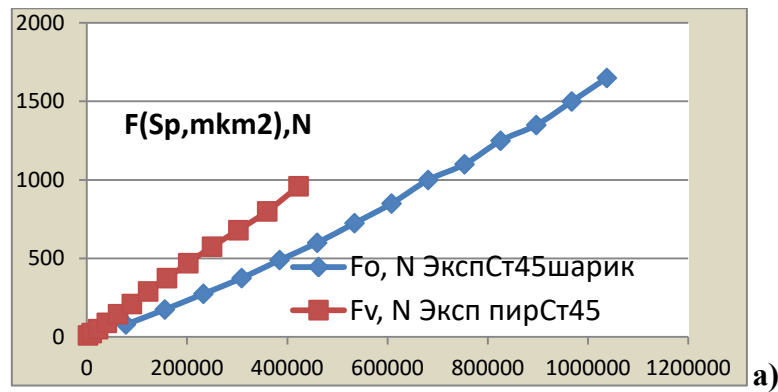
Параметры и функции  $HI(h)$  сохраняют недостатки обычного эмпирического механического метода, но позволяют видеть особенности развития физических процессов индентирования. Обсудим основные, по мнению автора, физические причины возникновения разных чисел твердости для одного материала, «размерный эффект» и др.



**Рис.4** Особенности диаграммы кинетической твердости  $HI(h) = F(h)/S(h)$ , сфера Бринелля D2,5mm, пирамида Виккерса. сталь 45, сталь 15XН2.

На Рис. 5а показан характер зависимости усилия индентирования  $F(S, \text{mkm}^2)$  от площади контакта для разных форм индентора, сфера D2,5mm и пирамида Виккерса. Рис.5b показывает характер изменения проекционной контактной площади  $S(h, \text{mm})$  от формы индентора с ростом глубины.

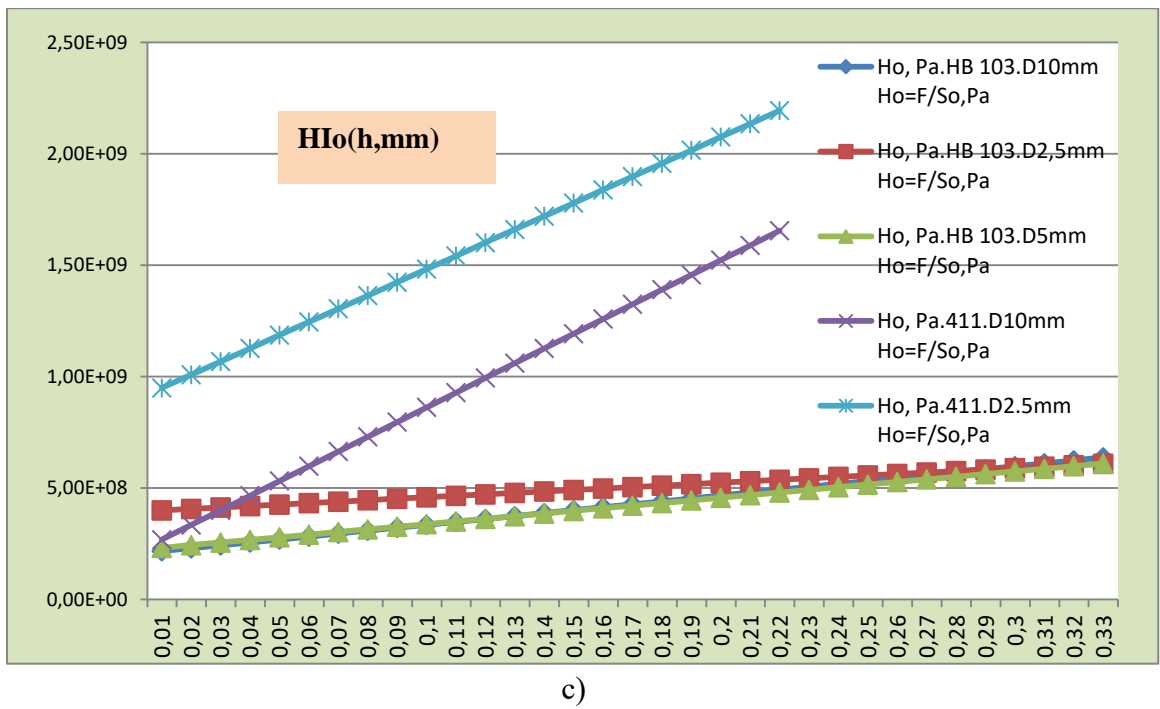
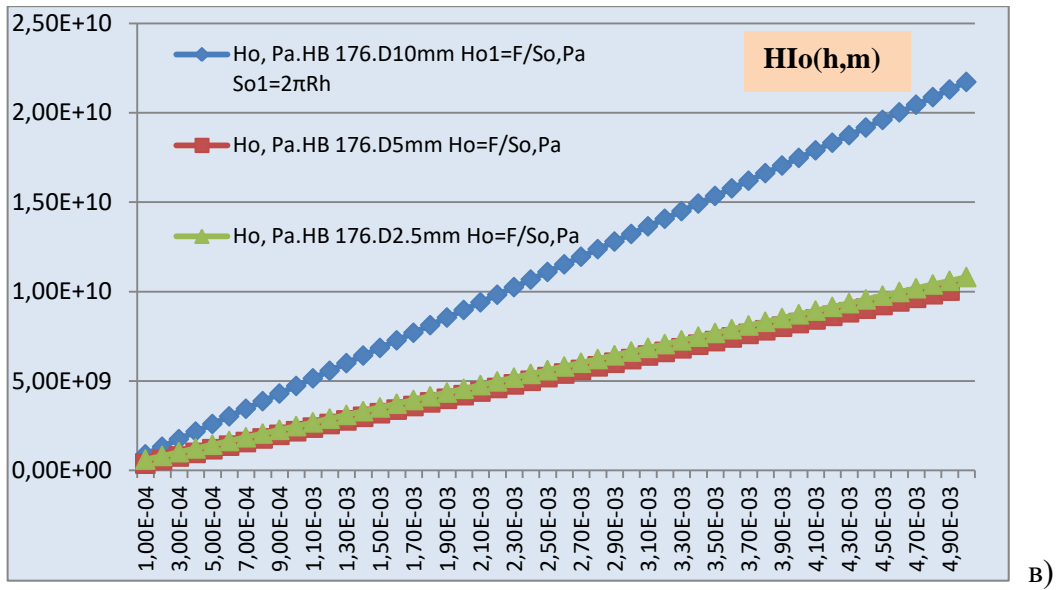
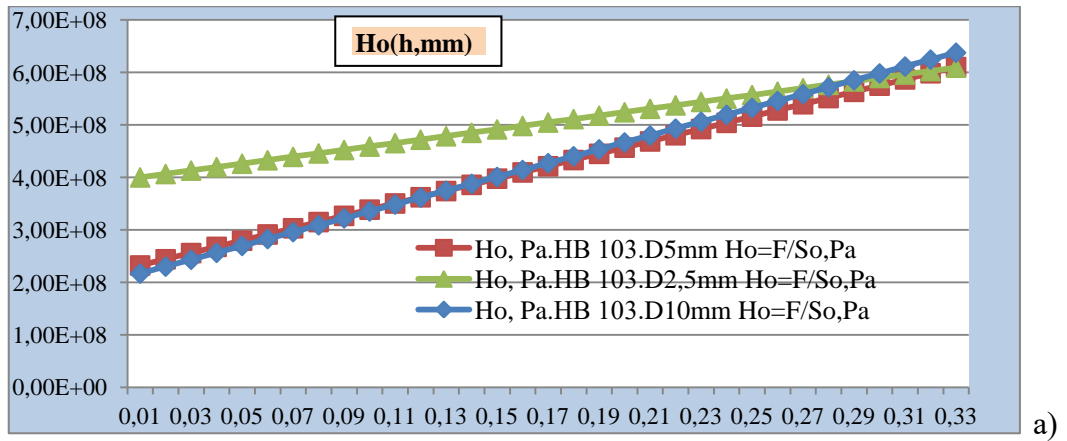
Функцию кинетической твердости  $HI(h)$  разделим условно на три этапа Рис.4. В начале процесса индентирования, до значения  $h=50-60 \text{ mkm}$ , твердость быстро меняется. Начальный период на рисунке обозначен I- пирамида, II – сфера. График функции на этих участках нелинейный, его форма зависит от геометрии инструмента. Сфера, участок II, неравномерное поле контактного давления, функция нелинейно растет. Пирамида, участок I, высокая начальная концентрация нагрузки, функция быстро нелинейно убывает. Далее наступает второй этап приблизительно линейного процесса. Третий этап получим в точке пересечения функций  $HI(h)$  сферы и пирамиды, путем линейной экстраполяции графиков. В точках  $h = 250 \text{ mkm}$  (15XН2) и  $260 \text{ mkm}$  (ст.45), получим значения твердости (макро диапазон), соответствующие стандартному методу Бринелля. Сталь 45,  $HBW = 2\text{GPa}$ . 15XН2,  $HBW = 2,7\text{GPa}$ . Результат совпадает с данными справочника [6]. Рассмотрим твердость  $HI(h)$  для пирамиды в начальной точке диаграммы (I –этап, начало кривой,  $h = 2-5\text{mkm}$ ). На графиках эти точки в начале процесса обозначены кружками, для двух сталей. Звездочками обозначены соответствующие численные значения. Эти крайние точки можно условно представить как наноиндентирование. В них значения  $HI$  хорошо согласуются с результатами наноиндентирования данных марок сталей. Результаты подтверждают существование размерного эффекта при определении эмпирической твердости. Одновременно мы получили большое расхождение чисел эмпирической твердости для макро и нано испытаний у одинаковых сталей. Это характерный результат эмпирического подхода.



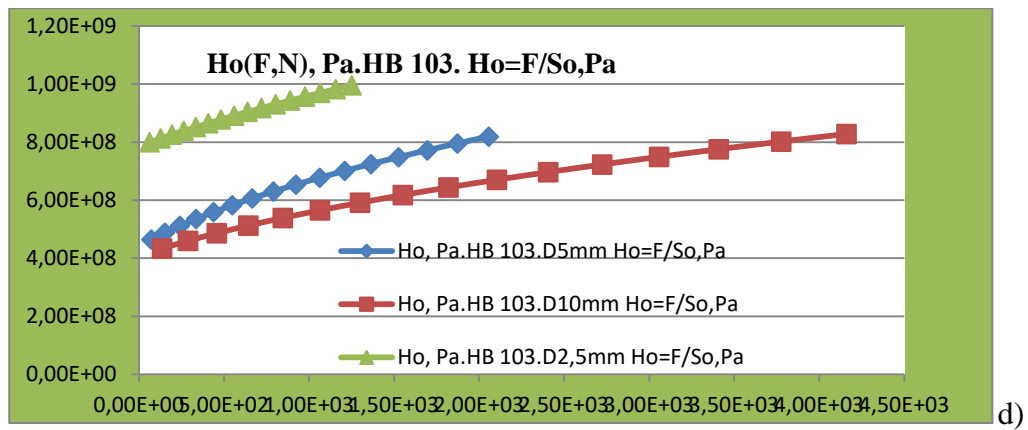
**Рис. 5.** а) Зависимость усилия индентирования  $F(S)$  от контактной проекционной площади  $Sp$ .  $F_o$  - сфера D2,5mm.  $F_v$  - пирамида Виккерса. Сталь 45. По данным [5]. б) Зависимость проекционной площади  $S_o, mkm^2$  от глубины  $h, mkm$ , для разной формы индентора.  $S_{p0}$  – сфера,  $S_{pv}$  – пирамида.

### Влияние диаметра сферы индентора на твердость.

Экспериментальные зависимости  $F(h)$  предоставлены профессором В.И. Мощенок. Теоретически построены зависимости кинетической твердости  $HI(h)$ , формула (1.1). Аппроксимация функции  $F(h)$  полиномом второй степени. Используя программу Excel, для образцов мер твердости HB103, HB176, HB411, построены зависимости твердости от усилия  $HI(F)$ . На Рис.6 показаны зависимости  $HI(h)$ ,  $HI(F)$ . Для образцовой меры H103, по методу Бринелля, сферы диаметром 2,5; 5,0; 10 mm, показана функция поверхностной твердости  $HI(h, mm)$ , очевидна существенная зависимость твердости от диаметра сферы. Пересечение графиков функций разных диаметров, указывает на неоднозначность процесса измерений Рис.6а. Это свойство неоднозначности наблюдалось на мерах H103, H176, H411 и на других инструментах. На Рис.6б показано как изменился порядок расположения графиков функций твердости  $HI(F)$  от усилия, по отношению к графикам  $F(h)$ ,  $HI(h)$ . График для диаметра D5 переместился на среднее положение из крайнего. Очевидна неоднозначность величины твердости  $HI$  посчитанной формулами (1; 1.1).







**Рис.6.** Влияние диаметра сферы на функцию твердости HI. Влияние твердости материала (HB 103, 176,411) и диаметра сферы на функцию HI(h). а) Поверхностная твердость, функция Ho(h,mm), мера твердости HB103. h =0,1- 0,33mm в) Поверхностная твердость, функция Ho(h,mm), мера твердости HB176. h =0,1- 5,0mm. С) Поверхностная твердость, функция Ho(h,mm), мера твердости HB103, HB411. d) Поверхностная твердость, мера твердости HB103, функция твердости Ho(F,N). По данным аппроксимации F(h) полиномами [ 1].

По моему предположению, главные причины неоднозначности применения эмпирических формул (1), (1.1), в неравномерности (во времени) и неоднородности распределения по контактной поверхности S и внутри объема Va работы (энергии) физических необратимых процессов. На первых этапах индентирования условная геометрическая поверхность контакта S неверно отображает физическую реакцию - поверхностную твердость. Поэтому формулы (1;1.1) с ростом h накапливают ошибки, формируют противоречивый результат. Показатель F/S (сила на единицу площади) дает противоречивое представление о физическом процессе индентирования в условиях изменения формы отпечатка, инструмента и одновременно глубины индентирования. Сопоставление результатов измерений твердости для разных инструментов некорректно. Особенно актуально это замечание на первом этапе, при интенсивном формировании физического объема и контактной поверхности. Граница первого этапа неустойчива, её положение зависит от нескольких факторов: микроскопической неровности поверхности, структурной анизотропии (кристаллиты, блоки и т.п.), формы индентора, локальной мощности процессов разрушения, теплопроводности материалов и др. Для исключения или минимизации этого отрицательного влияния необходимо создать соответствующий новый критерий твердости.

Следующий пример неоднозначности показателя механической твердости. Сравним значения механической твердости при равных проекционных площадях сферы (D2,5mm) и пирамиды Виккерса Svp = Sop. Сталь 45. Используем данные определения HI твердости [5]. При равных проекционных контактных площадях поверхностей, отношение F/s предполагает одинаковый или близкий физико-механический смысл процессов, близкие показатели условного напряжения эмпирической твердости. Фактически существенно разные значения твердости Hor и Hvp.

$$F_{vp}(12,5\text{mkm}) = 960.\text{N} \quad F_{op}(50\text{mkm}) = 490.\text{N}$$

$$S_{vp}(h = 12,5\text{mkm}) = S_{op}(h = 50,0\text{mkm}) \approx 39 \cdot 10^4, \text{mkm}^2$$

$$H_{vp}(S = 39 \cdot 10^4, \text{ mkm}^2) = 2,39 \cdot 10^9 \text{ Pa}, \quad H_{op}(S = 39 \cdot 10^4, \text{ mkm}^2) = 1,27 \cdot 10^9 \text{ Pa}$$

Результат анализа экспериментальных свойств индентирования указывает на различный характер физических процессов происходящих в активированном объеме. Равные контактные площади, при разных формах погруженной части индентора, имеют разные значения усилия  $F$ , различный вид графика функции  $F(h)$  и  $F(S)$ . На **Рис. 5а** показаны характерные зависимости усилия от контактной площади сферы и пирамиды.

Чем обусловлено различие твердости у одного материала, при равной проекционной площади контакта сферы и пирамиды? Механика ДТТ не дает физически обоснованного и убедительного ответа.

Анализ методов индентирования показал. Результаты индентирования материала, полученные разными по форме инденторами, корректно не сопоставимы, в рамках механической эмпирической меры твердости. Подобие разных эмпирических методов индентирования не корректно, возможно, условное сопоставление, корреляция. Разная геометрия индентора на первом этапе процесса существенно влияет на результирующий фактор – усредненное условное удельное давление и совершенную суммарную работу разрушения. В начале процесса индентирования, имеют место существенные различия в значении плотности энергии шарового тензора активированного объема, присутствует большой градиент плотности энергии материала. Это подтверждают теоретические и экспериментальные исследования [7, 8, 9]. На начальном этапе формоизменения материала происходит активная локальная ротация направления тензора главных нормальных напряжений в малых объемах. Происходит ротация волновых потоков мощности разрушения микроструктуры материала [10]. Возникают большие по мощности неоднородные локальные разрушительные и тепловые процессы [11] и др.

Исследуем неоднородность формоизменения и разрушения материала косвенно, на примере анализа деформаций образующих условную геометрическую площадь контакта разных инструментов  $S(h)$ . Оценим влияние формы индентора и глубины перемещения на свойства твердости, размеры контактной поверхности, деформационные свойства поверхности  $S$ .

Деформации поверхности контакта имеют преимущественно необратимый, пластический характер (более 90%). В свою очередь удельная мощность разрушительных процессов, при пластических деформациях, однозначно определяется через скорость необратимых относительных деформаций материала  $\dot{\epsilon}_r, 1/s$  [12]. Используем эти свойства для анализа.

## **2. Свойства функции контактной поверхности индентирования. Обобщенная скорость, деформационные характеристики, компоненты скорости образования поверхности.**

Рассмотрим функцию контактной поверхности  $S(h)$ . Обозначим параметры:

$\Delta S_o, m^2$  - приращение площади контактной поверхности в результате механического формоизменения за шаг перемещения  $\Delta h(\Delta t)$  сферы.

$\Delta S_v, m^2$  - приращение площади пирамидальной (конической) поверхности за шаг перемещения  $\Delta h(\Delta t)$ .

$S_{op}, m^2$  – проекционная площадь контактной поверхности активированного объема, индентор сфера.

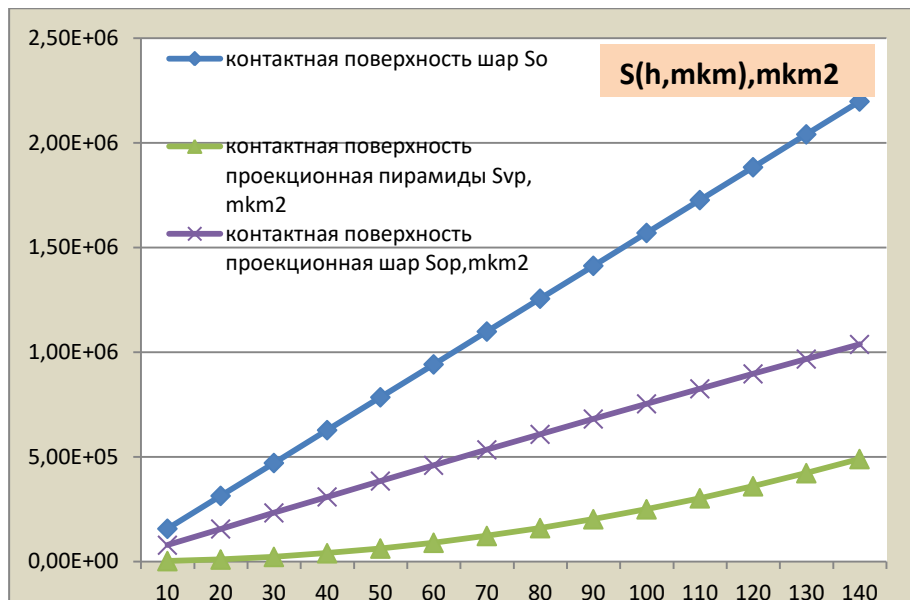
$\Delta S, m^2$  - приращение площади контактной поверхности.

$\varepsilon_{SA} = \frac{\Delta S_A}{S_A}$  - относительные деформации условной контактной поверхности.

На **Рис.7** показаны зависимости изменения площади контактной поверхности  $S$ ,  $mkm^2$ , активированного (вытесненного) объема от перемещения  $h$ ,  $mkm$ , при индентировании сферой  $D2,5mm$  и пирамидой Виккерса. На Рис.1 изображена условная геометрическая модель процесса индентирования.

Эмпирический подход определения числа твердости утвердился исторически, первоначально твердость имела относительно простой смысл. Метод появился около 250 лет назад, и не нуждался в ином толковании, например в связи с механической прочностью материала и др. В эмпирическом методе кинетического индентирования априори предполагается, что геометрическая поверхность  $S$  и объем вытесненного тела  $V_a$  могут о, объективно характеризовать внутренние активационные, разрушительные процессы материала при движении инструмента. По мнению автора, это заблуждение, результат консерватизма методов классической механики использованных для определения числа твердости. В современной механике отсутствует *физическая модель процесса* индентирования. Первоначально материал был представлен как континуумом, который не имел микроскопического физического устройства. Изменение физических свойств материала при индентировании игнорировалось. Твердость рассматривалась как механический акт образования вмятины или отпечатка в твердом теле. Процесс и физику индентирования «потеряли» по дороге.

Анализ экспериментальных свойств кинетиического индентирования, указывает на отсутствие однозначной зависимости твердости, как функции усилия  $F$  и геометрической площади контакта  $S$ , формула (1.1). Из анализа функций индентирования очевидно, сила реакции зависит от свойств распределения энергии внутренних активационных обратимых и необратимых разрушительных процессов в физическом объеме материала. Геометрический (условный) и физический объем индентирования представляют в общем случае разные меры и характеристики процесса. Физический активированный объем подробнее рассмотрим во второй части статьи.



**Рис.7** . Зависимость площади условной контактной поверхности S(h) от формы индентора и h.

### Обобщенная скорость образования поверхности контакта, компоненты скорости.

Рассмотрим дополнительные геометрические характеристики процесса образования контактной поверхности и объема материала вытесненного индентором при кинетическом индентировании.

$$\frac{\Delta S}{\Delta h} = S'_h - \text{обобщенная скорость образования контактной поверхности.}$$

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{\partial S}{S \partial h} \approx \frac{\Delta S}{S \Delta h} - \text{обобщенная относительная скорость условных деформаций}$$

образования контактной поверхности суммарного упругого и неупругого процесса формоизменения ДТТ, в результате роста глубины h, частная производная, Рис. 9.

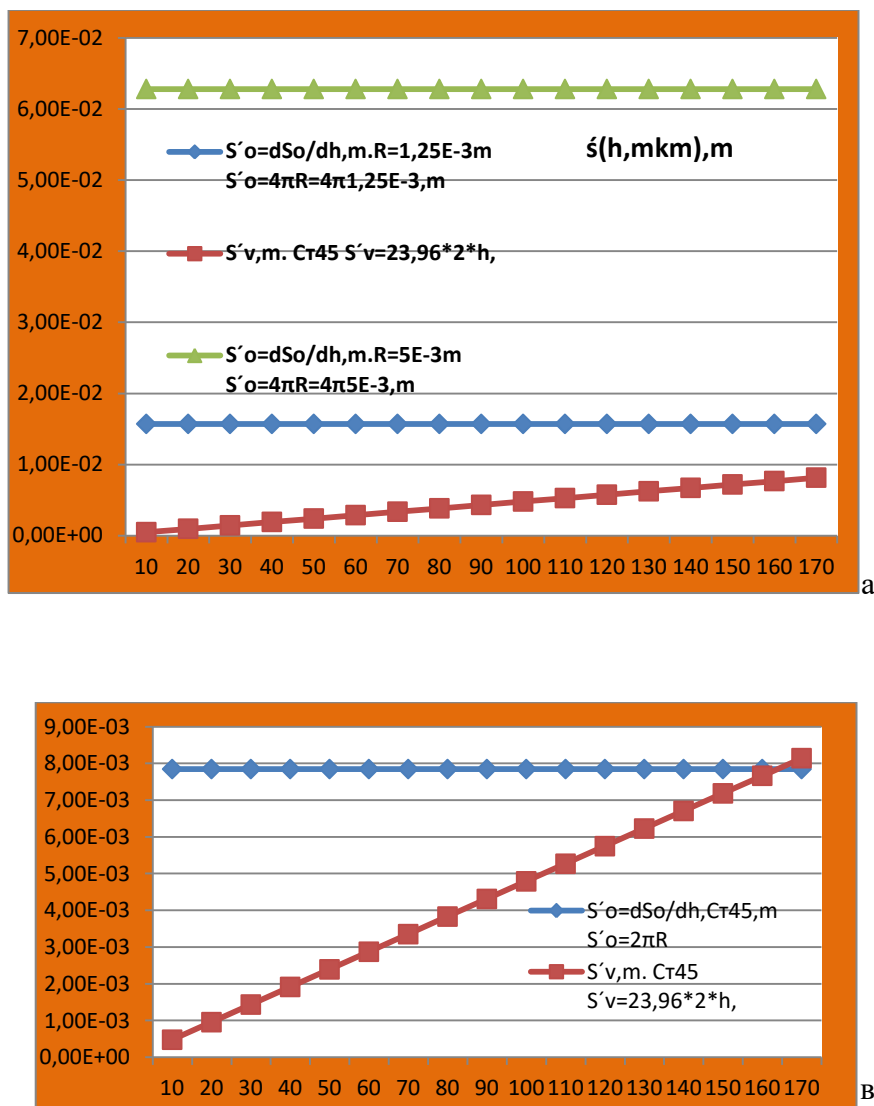
У индентора сфера присутствует особенность процесса формирования новой

Функции обобщенной скорости поверхности контакта  $S'_h(h)$  для сферы и пирамиды показаны на Рис. 8. Сфера обладает особым свойством, обобщенная скорость постоянная, не зависит от глубины, но зависит от диаметра сферы:

$$S'_h(h) = 2\pi R = \text{const} \quad (2)$$

Свойство (2) используем в физическом критерии твердости. В начальный период контакта инструмента с поверхностью образца фактическая площадь S представляет сложную функцию, происходит неустойчивый физический процесс взаимодействия тела инструмента и образца (материала). Усилие (реакция) F в определенном смысле случайный процесс. Он зависит от структуры, физических свойств, поверхности материала, скорости индентора т.д. Геометрическое значение площади S в начале

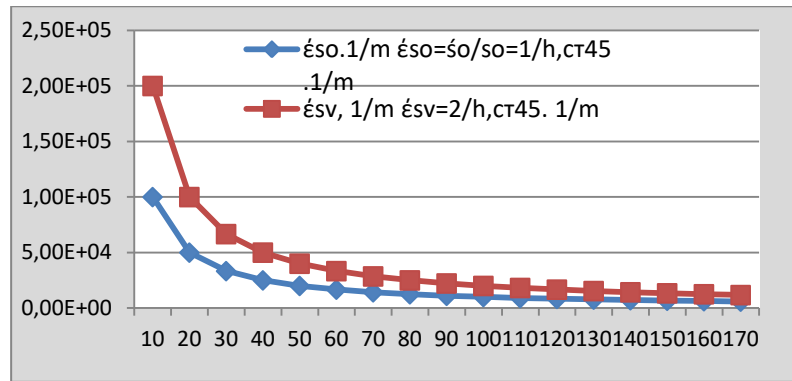
процесса практически неопределимо. Для снижения этого негативного эффекта в наноиндентировании применяют специальные меры подготовки поверхности.



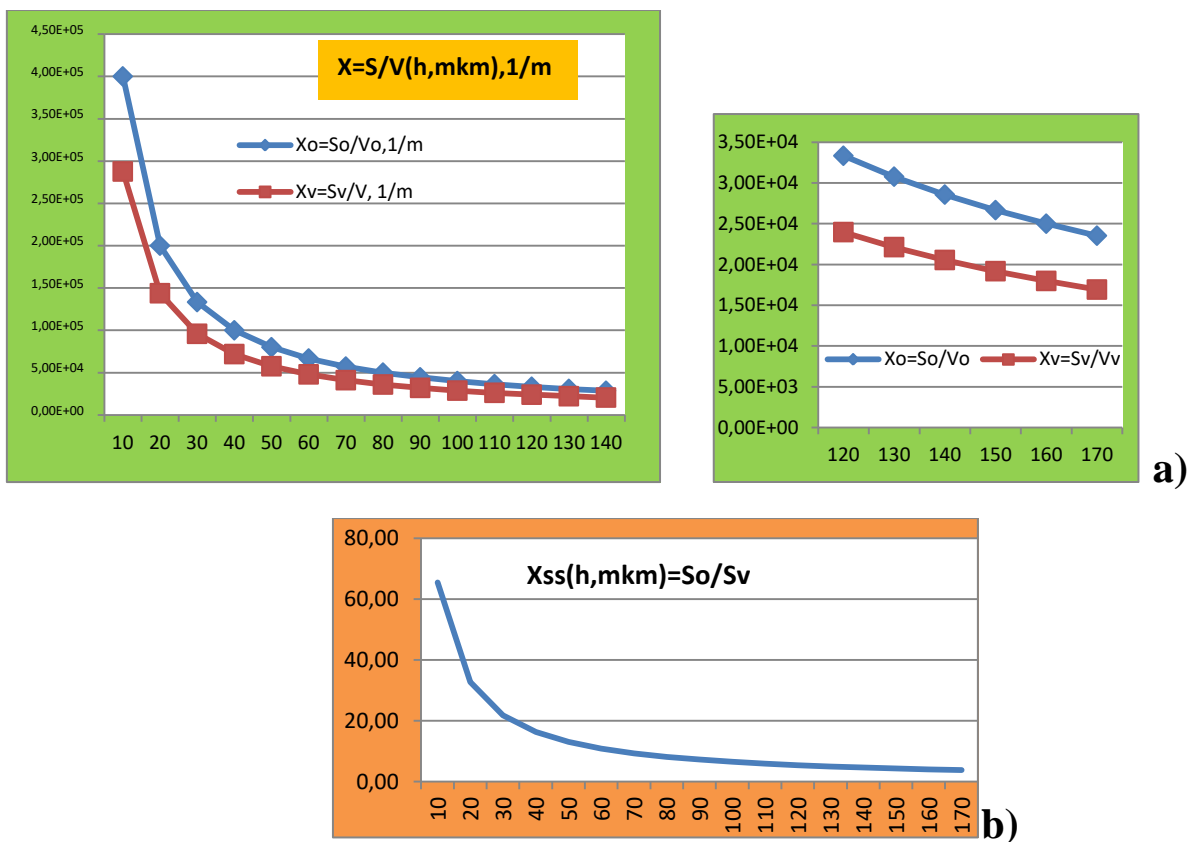
**Рис.8.** Функции обобщенной скорости роста контактной поверхности  $S'_h(h)$ , мкм от глубины  $h$ , мкм .

а) сфера, D2,5мм и 10мм, пирамида Виккерса. в) сфера D1,25мм и пирамида.

На Рис.9,10, дополнительный анализ свойств контактной поверхности. Зависимости позволяют видеть, что с ростом глубины индентирования наступает стабилизация процесса роста объема и поверхности контакта. Достигая некоторой глубины  $h^*$  индентирования, Рис.27, устанавливается приблизительно линейная зависимость площади от глубины  $h$ . При достижении  $h^*$  рост площади  $S(h)$  контакта сферы и пирамиды стабилизируется, обобщенные скорости роста поверхности сближаются.



**Рис. 9.** Обобщенная относительная безразмерная скорость роста поверхности сферы -  $\dot{\epsilon}_{so}$ , пирамиды -  $\dot{\epsilon}_{sv}$ . Для  $h > h^* = 120$  мкм, скорость стабилизируются, стремится к некоторой постоянной величине, независимо от формы инструмента.



**Рис. 10** Функция удельной контактной поверхности для разной формы индентора. **а)** Удельная контактная поверхность сферы  $X_{sv} = S/V, \text{m}$ , зависимость от  $h, \text{mkm}$ .  $S_o = 4\pi Rh$ . **б)** Отношение площади контактной поверхности сферы и пирамиды  $X_{ss}(h) = S_o/S_v$ , Нижний индекс о – сфера  $D_{2,5\text{mm}}$ , v- пирамида Виккерса

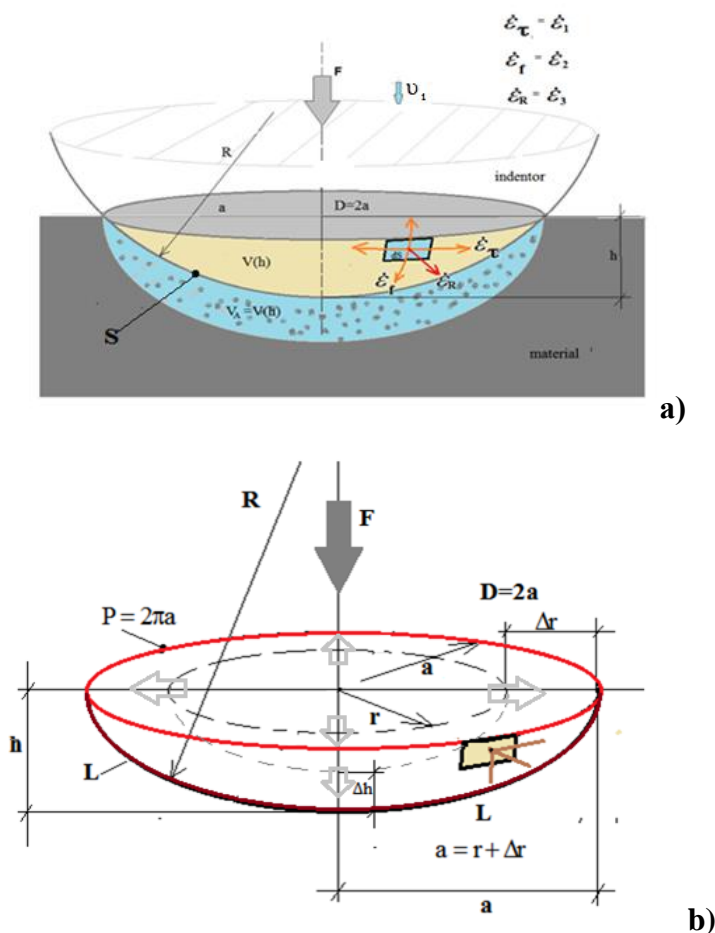
Анализ зависимостей геометрических параметров индентирования показывает, реакция  $F$  зависит от величины соотношения  $X_{sv} = S/V$ , площади контакта и активированного инструментом объема. Для пирамиды, особенно на начальном этапе, характерно большее значение параметра  $X_{sv}$ , соответственно  $F_v(h) > F_o(h)$ , при равных значениях  $h$ , Рис.3а. Исходя из физической теории прочности материалов [12.13,14] можно предположить, количество образованной свободной контактной поверхности  $S$ , зависит от числа элементарных разрушительных актов происходящих за единицу

времени, в единице физического активированного объема индентированного тела. Так же, образование поверхности зависит от суммарной удельной энергии, освобождающейся при этом. Для определения твердости индентирования материала, следует использовать удельную мощность разрушительного процесса. Абсолютное значение энергии разрушений (работа индентирования) представляет некоторую суммарную среднюю накопленную за весь период индентирования величину. Работа индентирования, определяется в стандарте ISO 14577-1:2002, характеризует некоторый средний условный уровень необратимого процесса структурных разрушений и изменений свойств материала. Фактически эти процессы неравномерны по времени и неоднородные по объему  $V_a$ .

Рассмотрим процесс индентирования, используя анализ необратимых деформаций поверхности контакта.

### Деформационные характеристики роста площади контактной поверхности.

На Рис. 11 схематически показана геометрия контактной поверхности сферы.



**Рис.11.** Модель образования условной сферической геометрической контактной поверхности  $S$  и условного активированного объема. а).  $V_A$  – условный объем индентора погруженного в материал.  $S$  – условная поверхность контакта. б). Рост радиуса кромки  $r$  и линий образующих контактную поверхность  $P, L$  при увеличении глубины  $h$ .

Обозначим скорость движения индентора -  $v_i$ , m/s. Периметр верхней контактной кромки сферы зависит от радиуса  $R$  и глубины перемещения инструмента  $h$ .

Периметр верхней кромки  $P(t)$  равен:

$$P(t) = \pi\sqrt{2Rh} = \pi\sqrt{2Rv_i t}$$

Где,  $h = v_i t$ ,  $t, s$  – время движения индентора от момента касания поверхности.

Обозначим компоненты деформаций линий образующих условную геометрическую поверхность контакта:  $\epsilon_t = \epsilon_1$  - тангенциальная,  $i=1$ ;  $\epsilon_a = \epsilon_2$  - апофема,  $i=2$ ; объемная составляющая  $\epsilon_R = \epsilon_3$  - радиальная,  $i=3$ , Рис.11b.

В формулах (1), (1.1) использованы площадь условного контакта  $S$  и условный геометрический объем  $V$  вытесненного тела материала. Эти величины представляют корреляционные параметры, во многих случаях определения твердости они неоднозначно отображают неоднородные по объему, переменные во времени, физические процессы упругопластического деформирования материала. Характер фактических отклонений физической поверхности и физического объема индентирования от условных геометрических параметров  $S, V$ , показаны в части «В» этой статьи. Там же, показан характерный случай физического, спонтанного образования поверхности и фрагмента откола объема вытесненного индентором материала. Указанные случаи следует отнести к реальным физическим результатам трансформации формы активированной области и не зависящему от формы инструмента росту новой свободной поверхности. Формируются спонтанные фрагменты высоко энергетически активированного объема материала индентирования. Это спонтанная реакция структуры материала на высвобождение энергии всей возмущенной напряжением термомеханической системы. При этом возникает физически активная «контактная поверхность» как собственная структурная граница в объеме испытываемого материала.

Изменение формы поверхности (например сферы разного диаметра) инструмента, как очевидно из экспериментальных данных, приводит к изменению характера физического процесса происходящего в активированном индентором объеме материала. Степень влияния геометрических параметров  $S, V$  на твердость у разных методов и инденторов, различная. Для того что бы определить физические параметры индентирования, более точно характеризующие твердость материала, в зависимости от формы инструмента, величины усилия и др., рассмотрим дополнительные характеристики.

Рассмотрим как зависит компонента относительной тангенциальной деформации  $\epsilon_t$  периметра кромки контакта  $P = 2\pi a$  ( $a$  – радиус кромки) сферического индентора, Рис.11. Определим условные относительные тангенциальные деформации периметра:

$$\epsilon_u = \epsilon_{ut} = \frac{\Delta P}{P} = \frac{P(h + \Delta h) - P(h)}{P} = \frac{\Delta h}{h_0}, \quad (4)$$

Где,  $\Delta P$  - приращение периметра верхней кромки контакта,  $h_0$  - начальное значение глубины физического индентирования, Где  $\Delta h = v_i \cdot \Delta t, m/s$ ,  $v_i, m/s$  - скорость индентора,  $\Delta t, s$  – шаг времени. Предполагаем, что в точке  $h_0$  завершена релаксация формирования однородного контакта инструмента и материала, наступил устойчивый



физический контакт индентора и материала. Далее наступает физико-механический контакт, стабильный рост усилия, формирование и рост активированного объема испытуемого материала. Достоверно величина  $h_0$  определена как начальное устойчивое значение усилия индентирования, наблюдается минимальный разброс показаний F. Из анализа экспериментальных данных [1], можно сделать вывод. Для двух различных режимов макро и нано индентирования, начальное условное значение глубины  $h_0$  равно:

Нано режим -  $h_{nan0} = 25-50 \text{ nm} = 0,025-0,05 \mu\text{m}$ .

Макро режим -  $h_{mak0} = 10 \div 20 \mu\text{m}$ .

Из сравнения следует. Начальное значение глубины  $h_0$  активного или физического контакта макро индентора сфера  $h_{mak0}$ , больше начального значения глубины нано индентора  $h_{nan0}$  в 400-800 раз, соответственно на 2-3 порядка.

Расчет по формуле (4) показывает, начальное значение относительных условных деформаций роста физической контактной поверхности, верхняя кромка, для одинакового шага перемещения индентора, больше у нано индентора чем у макро индентора в 400-800 раз:

$$\varepsilon_{unan} / \varepsilon_{umak} = h_{mak0} / h_{nan0} = 400-800.$$

Следовательно, при нано режиме индентирования, начальный процесс физической активации или скорость процесса накопления значительных относительных пластических деформаций, происходит существенно быстрее, чем у макро режима:

$$\varepsilon'_{unan} \gg \varepsilon'_{umak}.$$

Скорость компоненты линейных относительных деформаций поверхности физического контакта  $\varepsilon'_{unan}$  (область мощного процесса обмена энергии волн-квантистов от разрушения элементарного равновесия) для нано и микро индентирования больше чем эта скорость в макро режимах индентирования. Обобщая этот результат, можно сказать, что в начальных малых объемах активации процесса индентирования, относительные условные скорости процессов формирования физической материальной поверхности существенно больше, чем у макро режимов индентирования:

$$\frac{\varepsilon'_{unan}}{\varepsilon'_{mak}} = 10^{2-3} \text{ раз.}$$

Анализ свойств экспериментальных диаграмм (размер участка релаксации) показывает, что малым физическим объемом (областью) активации  $V_{pr}$  для конструкционных материалов можно считать  $1 \cdot 10^{-21} < V_{pr} < 1 \cdot 10^{-18} \text{ м}^3$ . Меньший объем – нано и больший микро режим индентирования.

Характерный линейный размер активированной области, приблизительно размер участка релаксации усилия, глубина  $h$  стабилизация роста нагрузки  $F(h)$ :

$$\text{нано режим } L_{pr} = 10^{-7} \text{ м} = 0,1 \mu\text{m} = \sqrt[3]{V_{pr}} = \sqrt[3]{1 \cdot 10^{-21}} \text{ м} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ мм} = 100 \text{ нм}.$$

$$\text{Микро режим, линейный размер менее } L_{pmi} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ мм} = 1,0 \mu\text{m}$$

В работе [13] получена аналитически зависимость удельной мощности разрушительных процессов в объеме ДТТ, она пропорциональна скорости пластических деформаций, так же пропорциональна пределу прочности материала. Обобщая эти факты

можно предположить, максимальная локальная удельная мощность активации необратимых процессов разрушений (деформаций) достигается в начальный период индентирования у вершины пирамиды, конуса, микро (нано) сферы и у любого нано индентора. В свою очередь удельная мощность разрушения увеличивает скорость роста шарового тензора (давление всестороннего сжатия) в активированном объеме.

У сферы с ростом глубины и активированного объема, величина относительных условных деформаций кромки убывает. Это свойство функции твердости видим у сферического индентора, с ростом глубины значение твердости  $H$  для разных диаметров сфер стремится к одной величине Рис.ба,с. Для конуса и пирамиды влияние вершины на твердость (нелинейность функции) сохраняется дольше, чем у сферы. С ростом абсолютного значения активированного объема  $V_a$  влияние на твердость высокого значения начальной плотности энергии разрушений у вершины пирамиды или малой сферы убывает Рис.3.

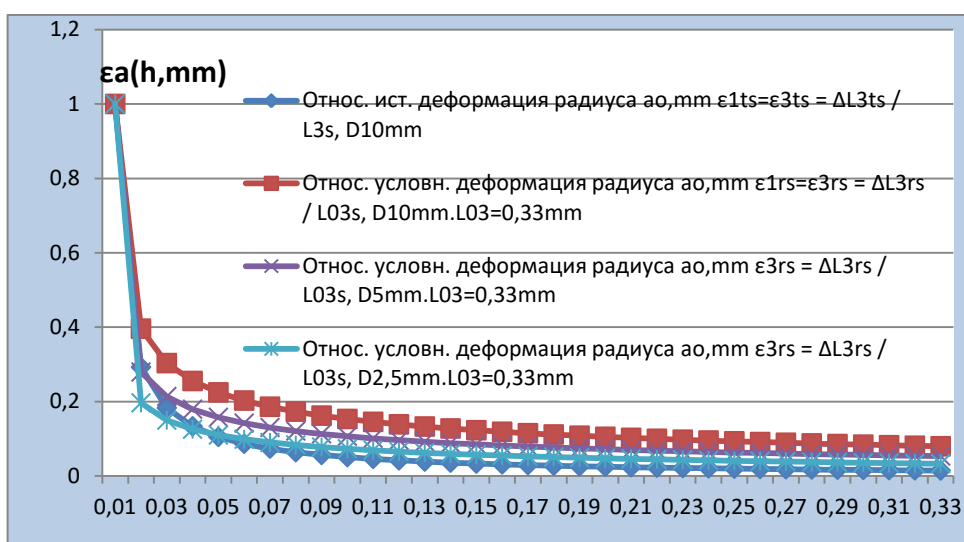
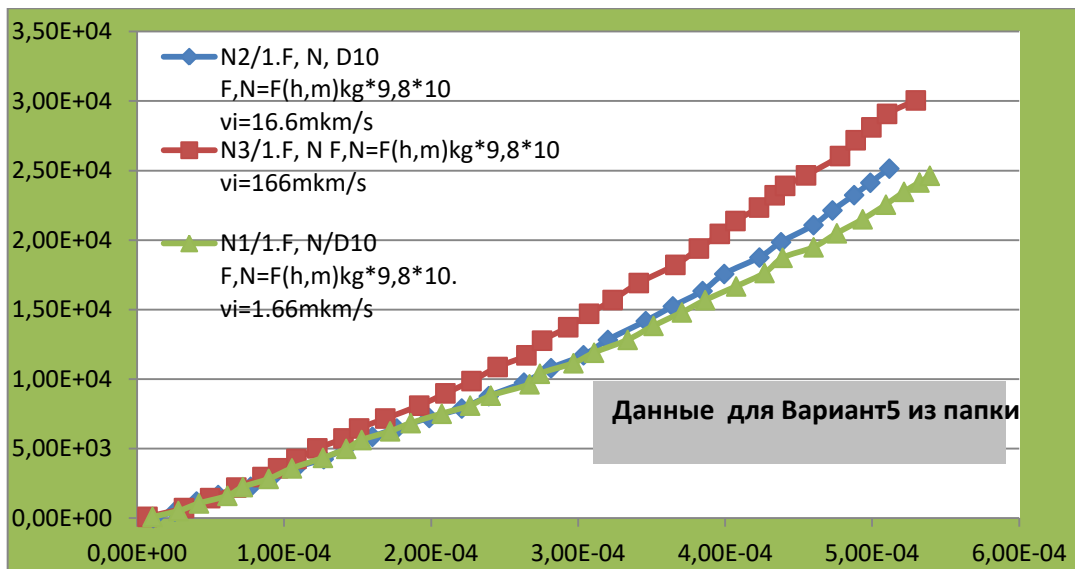


Рис. 12. Истинные и условные относительные деформации радиуса верхней кромки отпечатка сферического индентора D2,5/5/10. Мм, в зависимости от перемещения  $h$ , мм.  $L03s= 0,33$  мм.

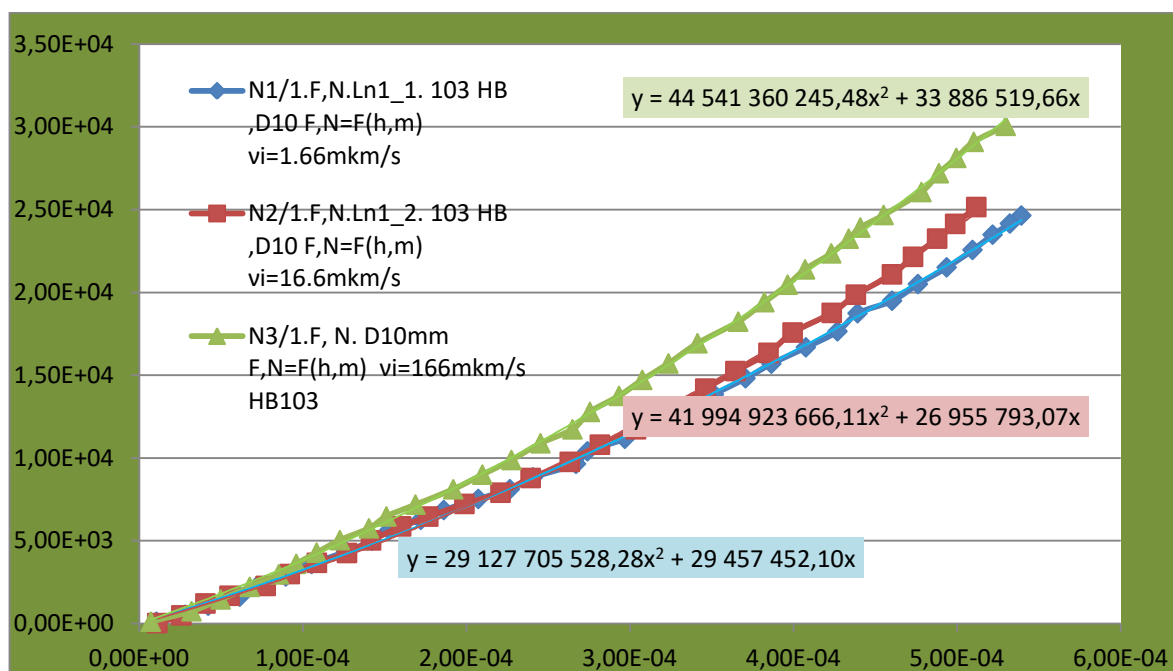
**Вывод:** скорость относительных деформаций материала в малых объемах на границе первоначальной контактной области макро режима, для индентора пирамида и конус, для любого нано индентора в 100 -1000 больше, чем средняя скорость относительных деформаций контактной поверхности для макро индентора формы сфера, пирамида, конус. По этой причине, предположительно, начальный показатель кинетической поверхностной твердости пирамиды, конуса  $H$  материала выше, чем усредненное значение эмпирического показателя поверхностной макро твердости  $F/S$ . По этой же причине нано твердость в большинстве случаев выше микро и макро показателя твердости. Далее это предположение обсуждается подробнее.

### 3.Зависимость твердости от скорости индентирования.

Для анализа влияния скорости индентирования  $v_i$ , м/с, использованы экспериментальные результаты профессора В.И. Мощенок ХНАДУ и профессора П.И.Стоева ХПИ.



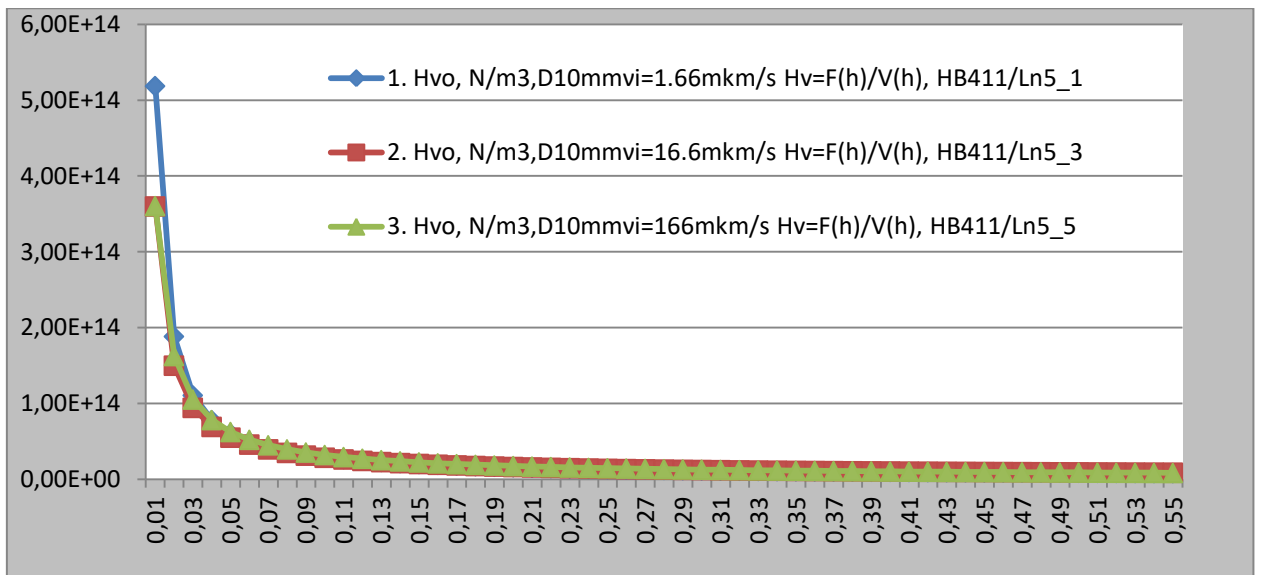
а)



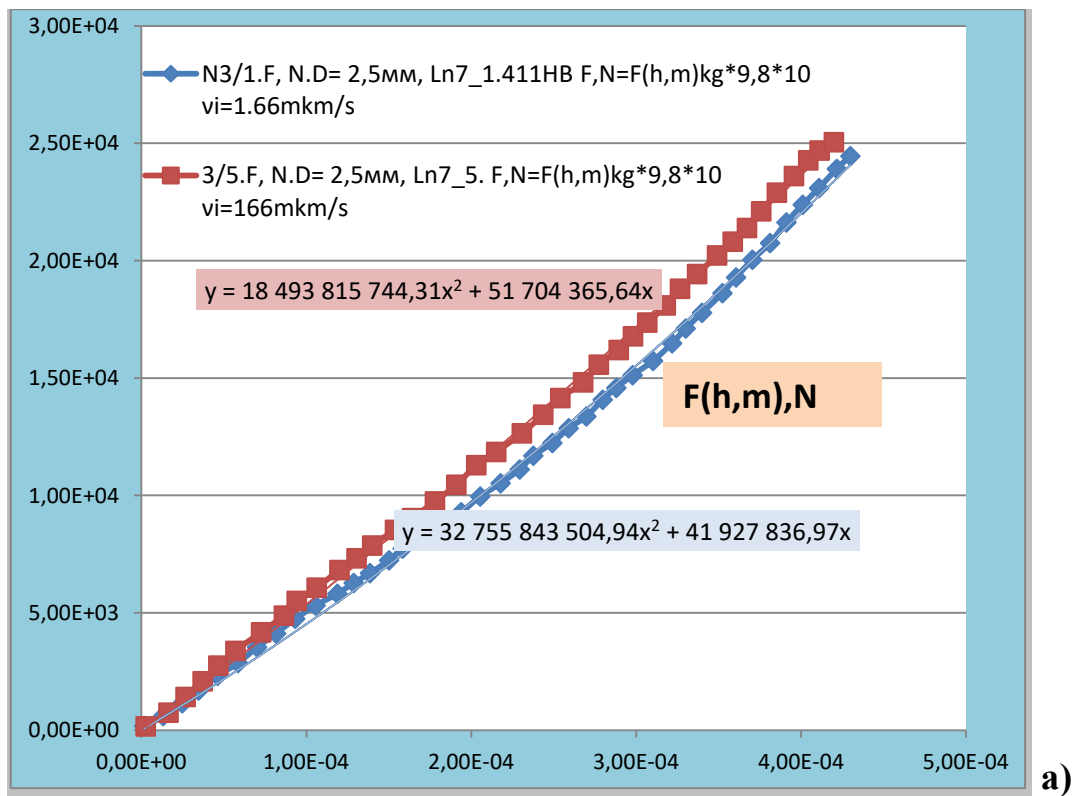
в)

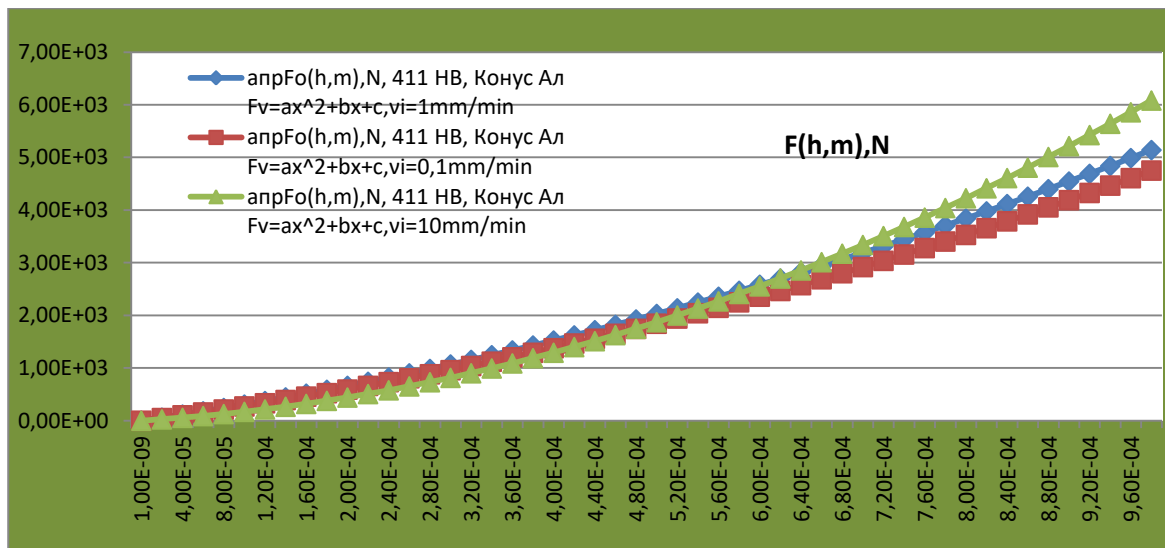
**Рис. 13.** Зависимости усилия  $F(h, m)$  от скорости индентирования для образцовой меры HB 103, индентор сфера D10 mm., а) аппроксимация полиномом второй степени, в) показаны коэффициенты полином функции  $F(h)$ . Данные эксперимента профессора В.И. Мошенок ХНАДУ.

Испытания проводились на образцовых мерах твердости HB 103/176/411, скорость движения индентора: 0,1 /1,0 /10, 0 мм/мин. Инденторы сфера диаметра D2,5/5/10mm, конус алмазный. Графики характерных функций нагрузки Рис. 13,15. Аппроксимация функции  $F(h)$  полиномами второй степени.



**Рис. 14.** Зависимости объемной твердости  $H_V(h, \text{mm})$  от скорости индентирования, сфера D1mm, образцовая мера HB411. Данные эксперимента профессора В.И. Мощенок ХНАДУ.

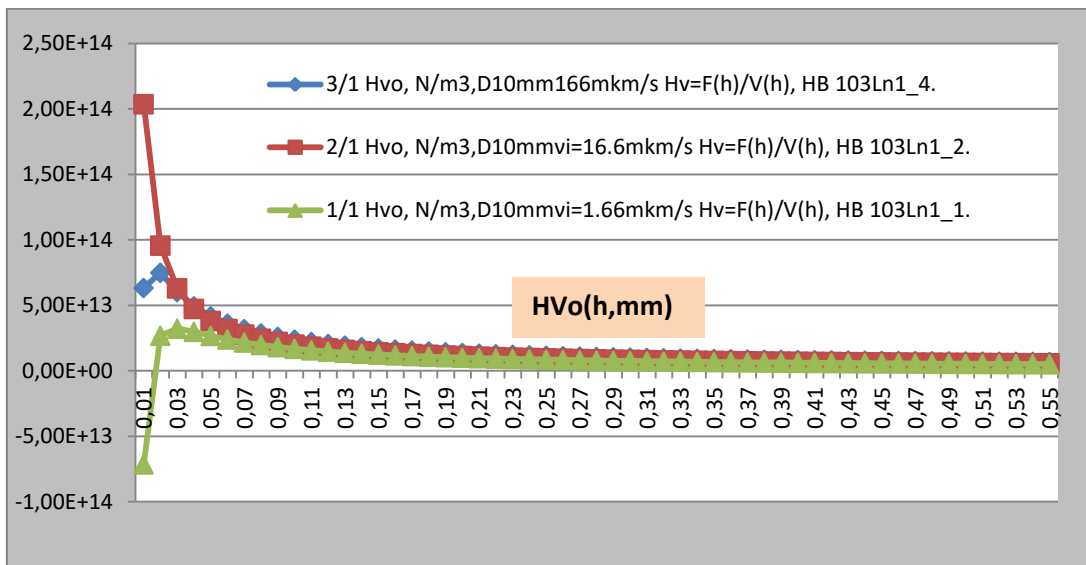




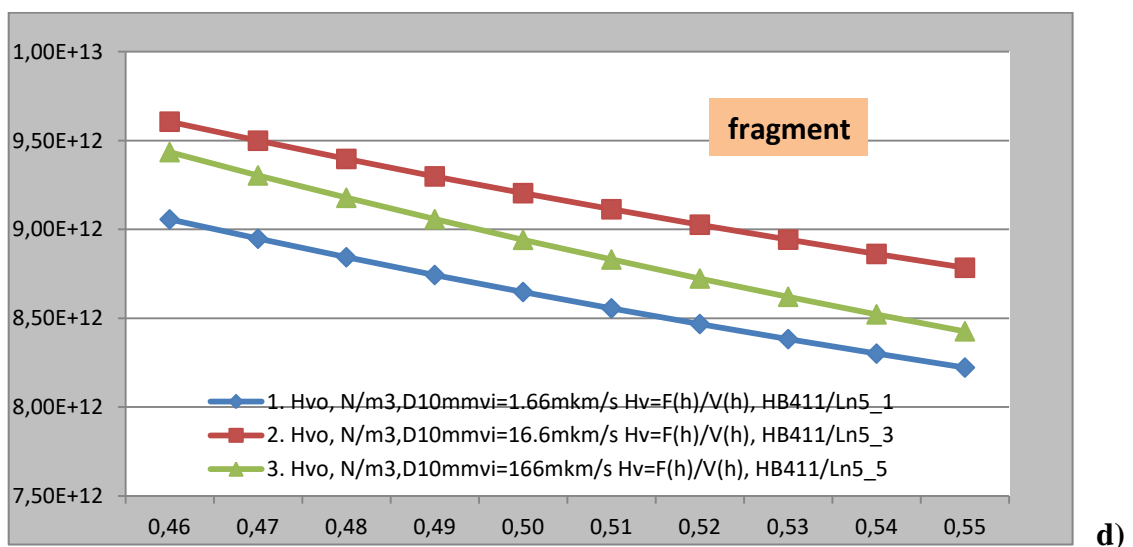
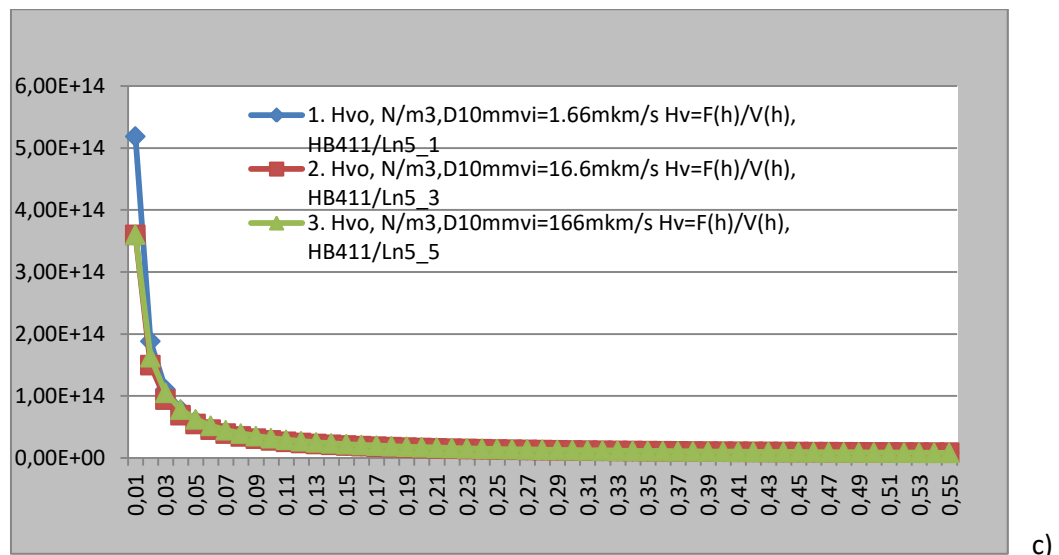
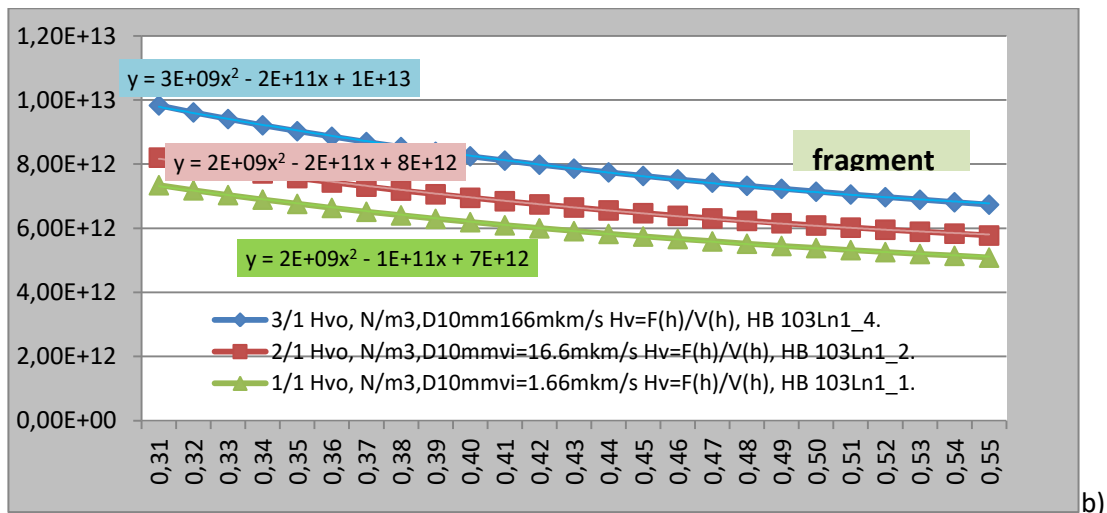
В)

**Рис. 15.** Зависимости усилия  $F(h,m)$  от скорости индентирования для образцовой меры HB 411, а) индентор сфера D2,5 mm., аппроксимация полиномом второй степени, в) индентор алмазный конус. По данным профессора В.И. Мошенко ХНАДУ.

На Рис. 13-16, показаны характерные результаты обработки экспериментальных данных. Скорость индентирования варьировалась на трех разных уровнях, весь интервал изменений три порядка (в тысячу раз): 1,66mkm/s (0.1 mm/min), 16.6mkm/s (1 mm/min), 166mkm/s (10 mm/min).



а)



**Рис.16 a,b,cd.** Характерные зависимости усилия индентирования  $F(h)$  и твердости  $HI(h)$  от скорости индентирования: а) образцовая мера HB103, б) фрагмент графиков а, с) HB411, сфера D10mm. д)

фрагмент графиков с, Скорость указана на рисунке. По данным профессора В.И. Мощенок ХНАДУ.

Эти результаты убедительно показали увеличение твердости  $H(h)$  с ростом скорости  $v_i$  кинетического индентирования. На Рис. 16 графики зависимости кинетической твердости от скорости индентирования. После достижения некоторого значения  $h$  функции твердости поменялись порядком чередования. Разброс значений небольшой. На графиках видна устойчивая зависимость роста твердости  $H(v)(h)$  от скорости индентирования  $v_i$ .

На основании обработки экспериментальных результатов проф. В.И. Мощенок, проф. П.И. Стоева, образцовые меры HB 103/178/411, скорость индентирования 1,66mkm/s, 16.6mkm/s, 166mkm/s, индентор сфера D1,25/2,5/5, mm получена приближенная формула корреляции роста твердости от роста скорости:

### **Формула зависимость твердости от скорости индентора (X)**

**Вывод:** Наблюдаем устойчивый рост твердости с увеличением скорости индентирования. Характерный пример для стали. Образцовая мера HB103, D10mm сфера. При росте  $v_i$  в 10 раз имеем рост твердости HB на 3% (0,03). Образцовая мера HB411 рост  $v_i$  10 раз рост твердости 1% (0,01). При росте скорости в 100 раз имеем рост HB на 30%. При росте  $v_i$  -10 раз имеем рост HB на 3% (0,03). Далее зависимость твердости от скорости формоизменения будет использована для анализа физических причин роста значений твердости при переходе от режимов макро на микро и нано индентирование. Уменьшение размеров индентора в десятки и тысячи раз, приводит к соответствующему изменению скорости деформаций, мощности необратимых процессов на контактной поверхности материала и др.

Рост скорости в 1000 раз ( $1E+3$ ) будет означать рост PVA на 100-300% (2-4раза), в зависимости от типа инструмента и исходной "статической" механической твердости. Следует исследовать компоненты деформации  $S_0$  на поверхности контакта, их изменение с ростом  $h$ , эти величины связаны. При равных скоростях индентирования  $v_i$ , конус, шар, пирамида имеют разные ускорения деформаций поверхности контакта, разный вклад в плотность упругой энергии  $W_6$ , работу разрушения, мощность теплообразования.

Эти результаты, позволяют перейти к формуле связи роста твердости от размеров активированного объема, или его линейных характерных размеров. Уменьшение размера активированного объема  $V_a$ , до критического  $V^*$ , инициирует механизм трансляционного ротационного процесса RT. Наблюдаем, предположительно, рост турбулентности потока энергии квазичастиц, от разрушенных связей. Ламинарный процесс индентирования материала, происходит при больших радиусах (диаметрах) индентора, более 2.5 мм. Для определения твердости нано индентора необходимо использовать физический коэффициент влияния процесса «турбулентности» потоков энергии разрушения структуры на твердость.

#### 4. Свойства функции объемной твердости.

Рассмотрим характерные свойства кинетической диаграммы объемной твердости  $Hv(h), N/m^3$ , Рис.17-XX. Подробности метода определения объемной твердости в работе [1]. По моему мнению, объемная твердость представляет следующий шаг к физическим методам индентирования. Формулы расчета объемной твердости в общем, упрощенном виде:

$$Hv = F/V, N/m^3 \quad (6)$$

$$HIV(h) = F(h)/V(h), N/m^3 \quad (6.1).$$

Где,  $Hv$  - механическая объемная твердость,  $HIV(h)$  - кинетическая объемная твердость.

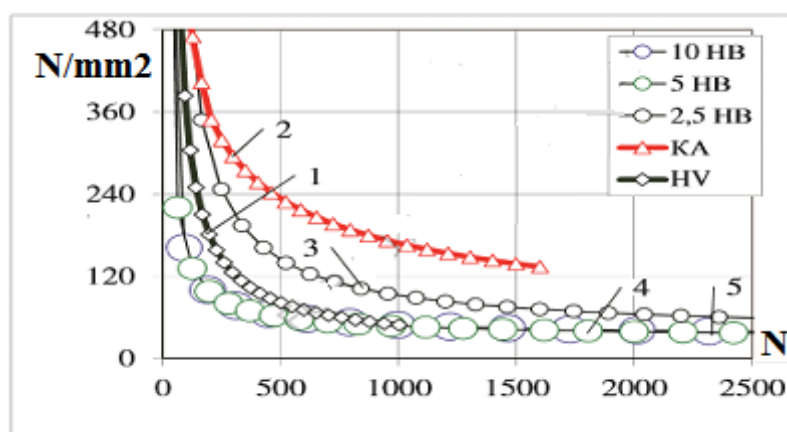


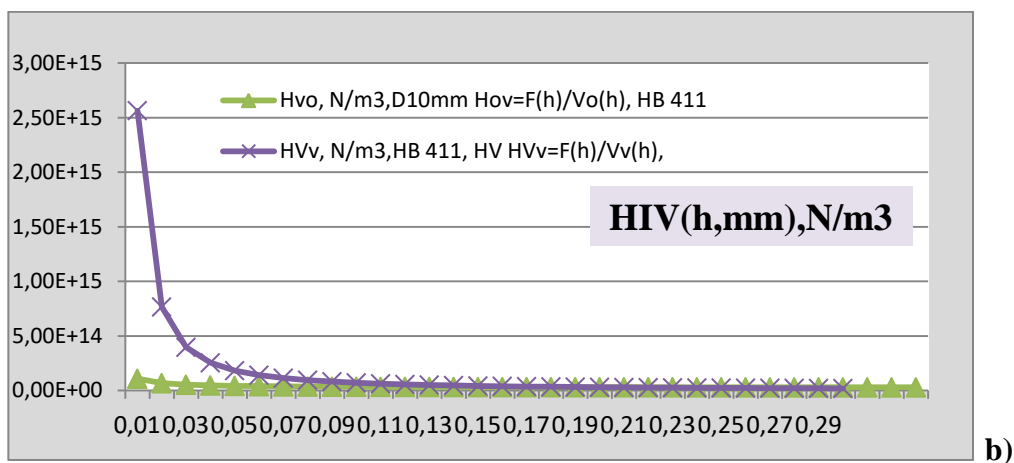
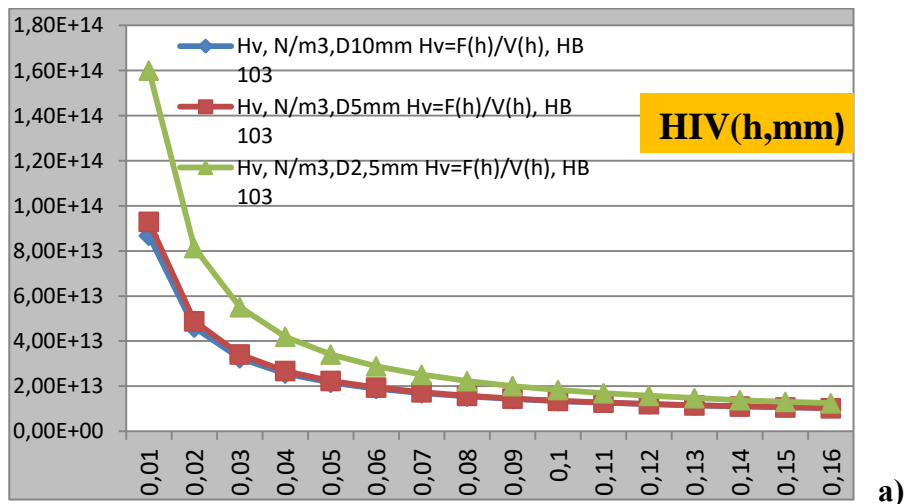
Рис. 17 . Зависимость объемной макротвердости  $HIV(F,N), N/mm^2$ , образцовой меры HB411, полученной разными инденторами: 1 – пирамида Виккерса; 2 - конус с углом при вершине  $120^\circ$ ; 3 – сфера  $D2,5mm$ ; 4 – сфера  $D5mm$ , 5 – сфера  $D10mm$ . Из монографии [1] профессора В.И. Мощенок ХНАДУ.

Влияние начального неустойчивого, нелинейного периода индентирования на число объемной твердости материала снижается, это свойство вытекает из аналитического принципа формулы (6). Знаменатель (6) больше почти на порядок, относительно поверхностной твердости (1), учтена дополнительная степень свободы роста активированного объема. На Рис. 17-27 показан характер функции  $HIV$  для различных диаметров сферы, пирамиды Виккерса, алмазного конуса. Зависимости  $HIV$  показаны от глубины, объема, усилия индентирования, твердости материала. Объемная твердость в меньшей степени зависит от формы индентра. С ростом глубины индентирования, у разных инденторов, значения твердости одного материала, стремятся к общему значению. На Рис. 22b, на малом фрагменте диаграммы, с большими значениями глубины  $h$ , показаны графики твердости полученные для инденторов разной формы. Очевидна устойчивая связь между диаметром сферы и значением твердости  $HIV$ . С уменьшением диаметра твердость растет. Особенно хорошо видна роль формы контактной поверхности,

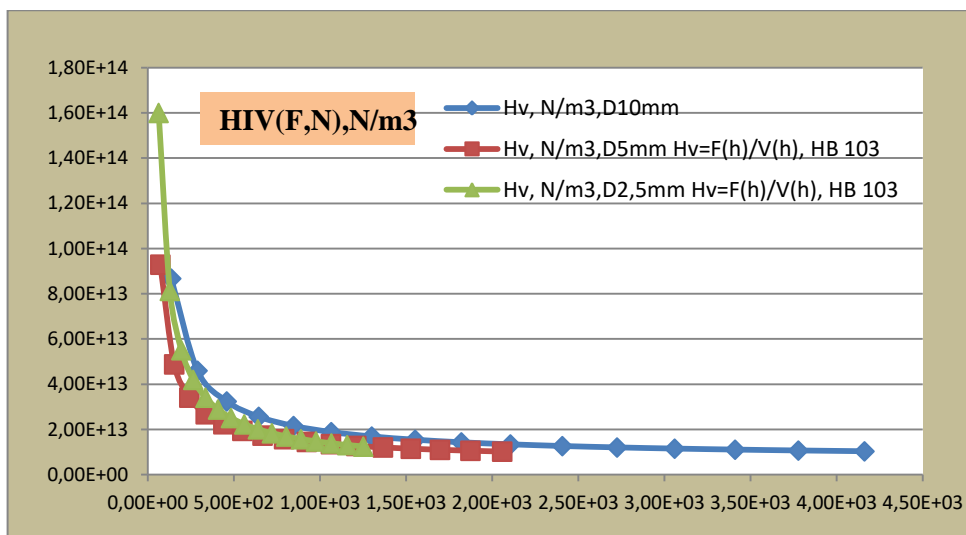


влияние свойства функции объема  $V(h)$  для разных форм инструмента, в формировании числа объемной твердости. Характер функций  $V(h)$  разных инденторов на Рис. 23,24.

На Рис. 18 видна устойчивая обратно пропорциональная зависимость ( $1/\dot{s}h \dot{s}=\partial S/\partial h$ ) объемной твердости  $HIV$  от обобщенной скорости роста поверхности контакта на начальном этапе процесса.

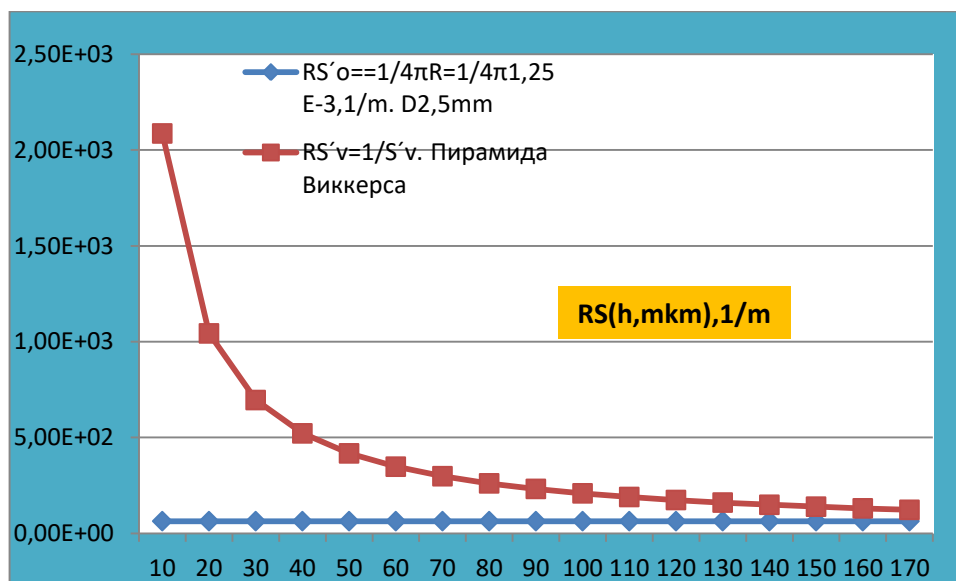


**Рис. 18** Зависимости объемной макротвердости  $HIV(h,mm)$ ,  $N/mm^2$ , образцовая мера: а) HB103, сфера диаметром D2,5/5/10,mm; б) HB411, пирамида Виккерса; сфера D10,mm. По данным профессора В.И. Мощенок ХНАДУ.



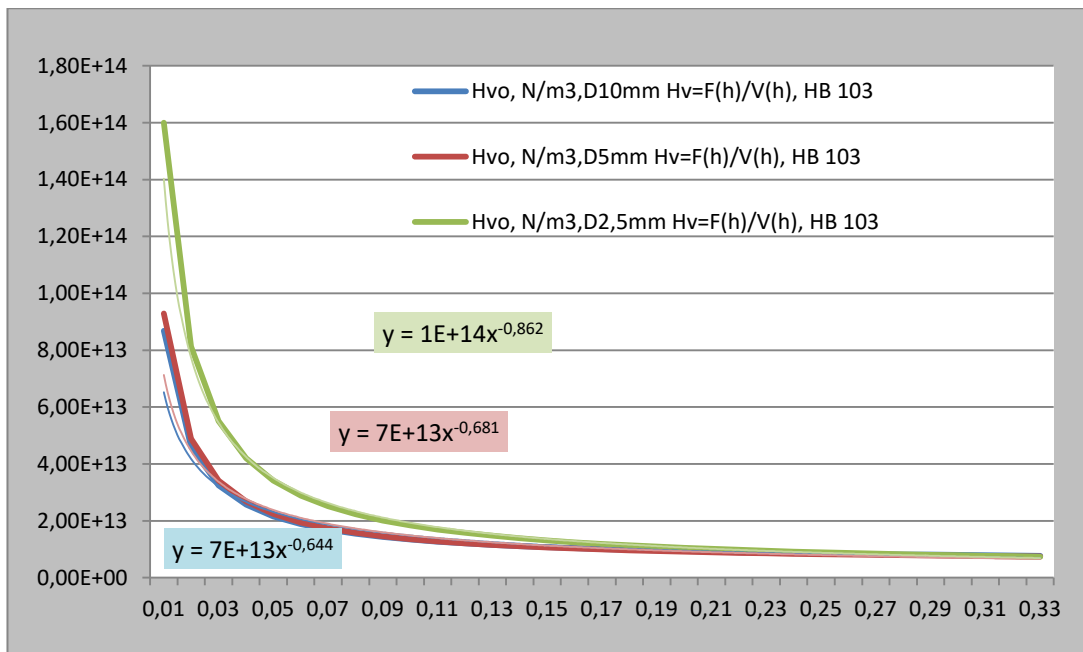
**Рис.19.** Зависимости объемной макро твердости: а) HIV(F,N), N/mm<sup>2</sup> для образцовой меры HB103, индентор сфера диаметром D2,5/5/10,mm.

На Рис. 19 хорошо видна смена («нарушение») порядка следования графиков объемной твердости HIV, при последовательном увеличении диаметра сферы, D2,5/5/10,mm. Это свойство проявляется за счет изменения механизма физического влияния диаметра на твердость. Подобный характер влияния формы сферы показан ранее для поверхностной твердости. Используются данные эксперимента из монографии [1].

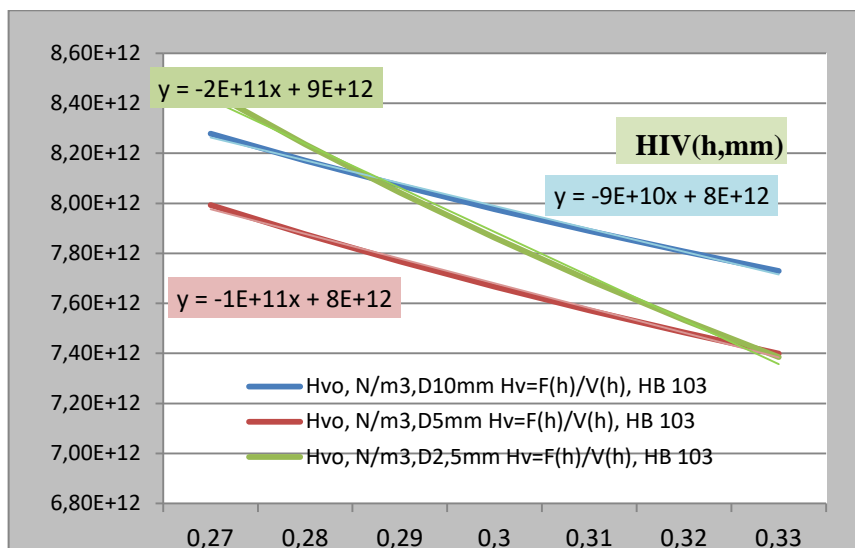


**Рис.20.** Обратная зависимость величины обобщенной скорости роста поверхности контакта - RS(h,mkm); v - пирамида Виккерса, o - сфера D2,5 mm. HB411, HV(h,mm).

На Рис.20 показана зависимость обратной величины скорости роста поверхности  $RS = 1/\acute{s}$ , где  $\acute{s}$  – обобщенная скорость роста поверхности контакта, от формы индентора.



a)

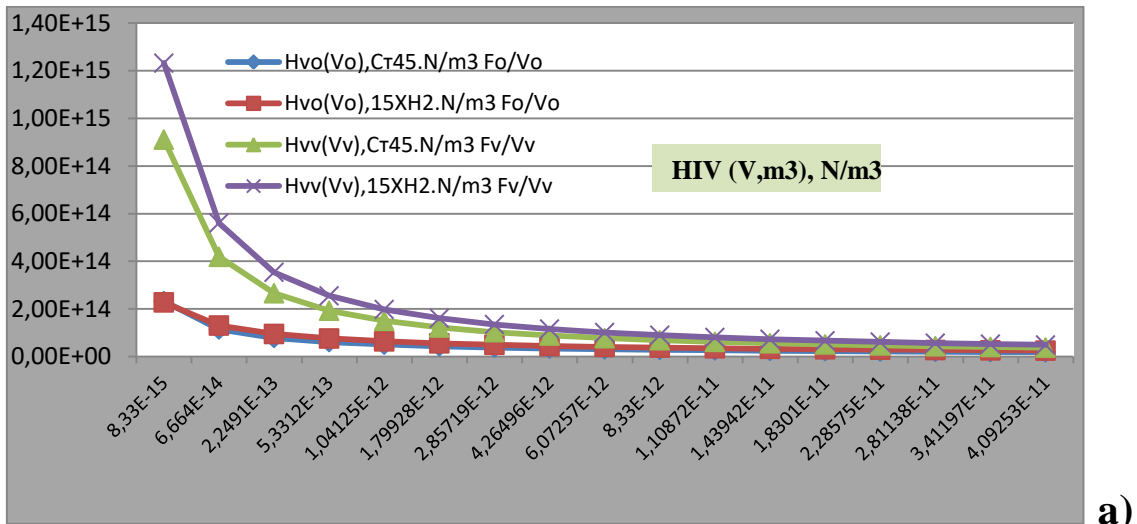


b)

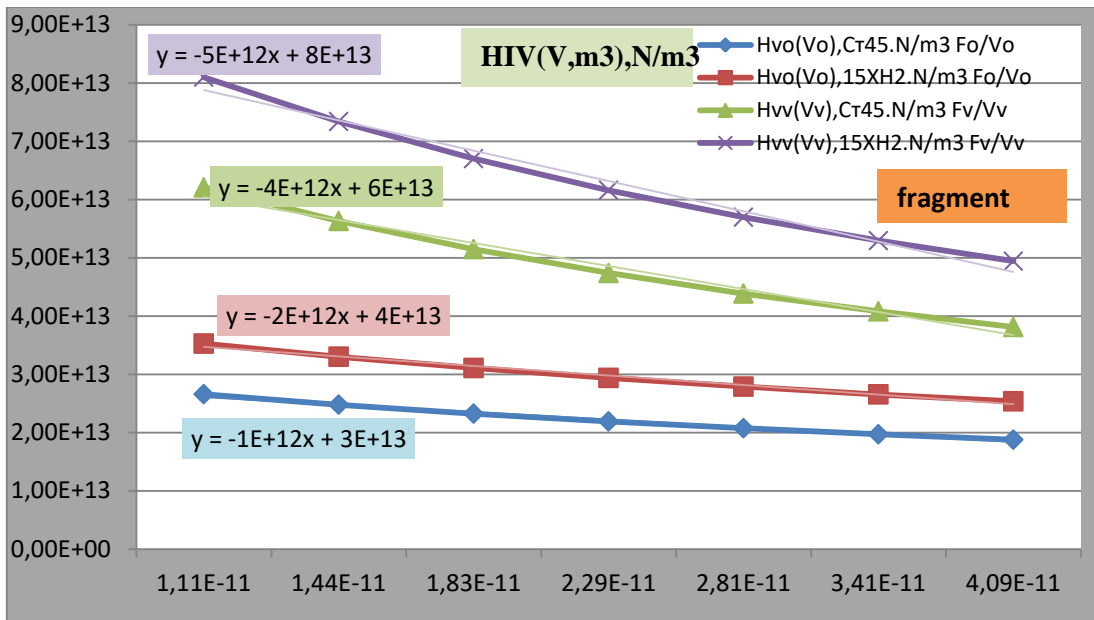
**Рис.21a,b.** Характерный случай пересечения графиков объемной твердости (неоднозначность измерений) разных диаметров индентора, для одной меры твердости HB103. а) Аппроксимация  $HIV(h,mm)$  степенной функцией. б) Фрагмент графиков окончания процесса индентирования HB103. Участок стабилизации процесса, пересечение графиков разных сфер, аппроксимация полиномами.

На Рис. 18,19 зависимости объемной твердости  $HIV(h)$ ,  $Hv(F)$  от параметров  $h, F$  и диаметра индентора. При замене в функции объемной твердости  $HIV$  аргумента глубины  $h$ , на усилие  $F$ , происходит смена характера влияния диаметра сферы  $D$  на поведение функций (меняется порядок влияния диаметров сферы на порядок расположения графиков).

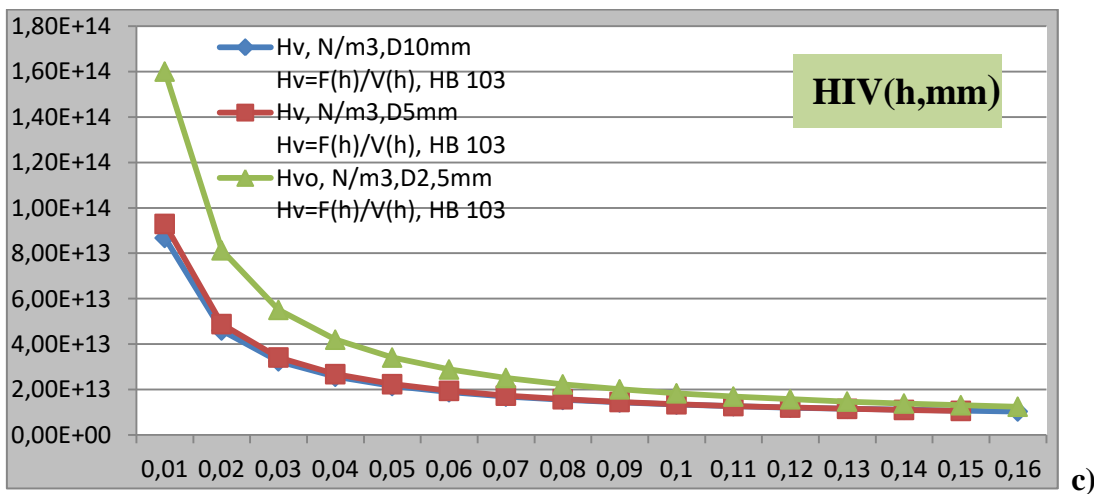
Близкие значения твердости у разных по форме и размерам инструментов возможны на больших значениях  $h$ , в широком интервале. При больших значениях  $h$  функции твердости  $HIV$  линейные, влияние диаметра на твердость приблизительно одинаковое. Характерно небольшое устойчивое различие твердости в абсолютных значениях, для одного материала, они строго зависят от диаметра индентора.



a)



b)



c)

Рис. 22, **a,b**. Объемная макро твердость: а) **HI V(V,m3), N/m3** сталь 45 и 15XH2 . Эксперименты ИПП НАНУ [5] Пирамида Виккерса и сфера D2,5mm, б) фрагмент диаграммы **HI V(V,m3), N/m3/** с) **HI V (h,mm), N/m3** образцовая мера HB103, По данным профессора В.И. Мощенко ХНАДУ.

На Рис.22 показан характер поведения функции объемной твердости на участках стабилизации процесса индентирования для конструкционных сталей и образцовой меры HB103.

При больших значениях  $h$  функции  $HIV(h)$ ,  $HIV(V)$  пологие, становятся практически линейными Рис. 22. Подобная картина для функций  $HIV(h)$  Рис. 18, образцовые меры.

Хорошо видно стремление параметра объемной твердости  $HI$  к росту при уменьшении объема индентора. Вершина пирамиды, на начальном этапе, подобна малой сфере, которая вписанная в вершину пирамиды. При больших значениях глубины  $h$  влияние диаметра и глубины на твердость  $H_v$  практически одинаковое у разных по диаметру сфер, Рис. 27. При этом получаем близкие значения объемной твердости для разной сферы.

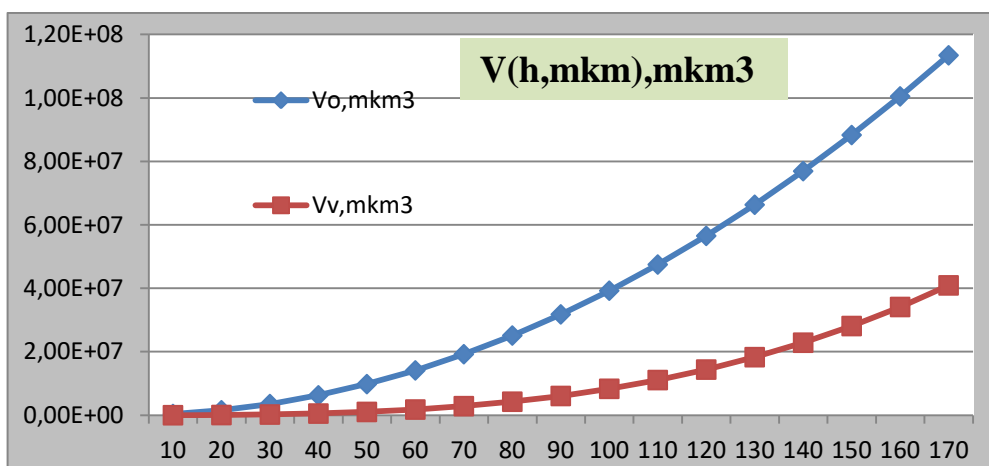
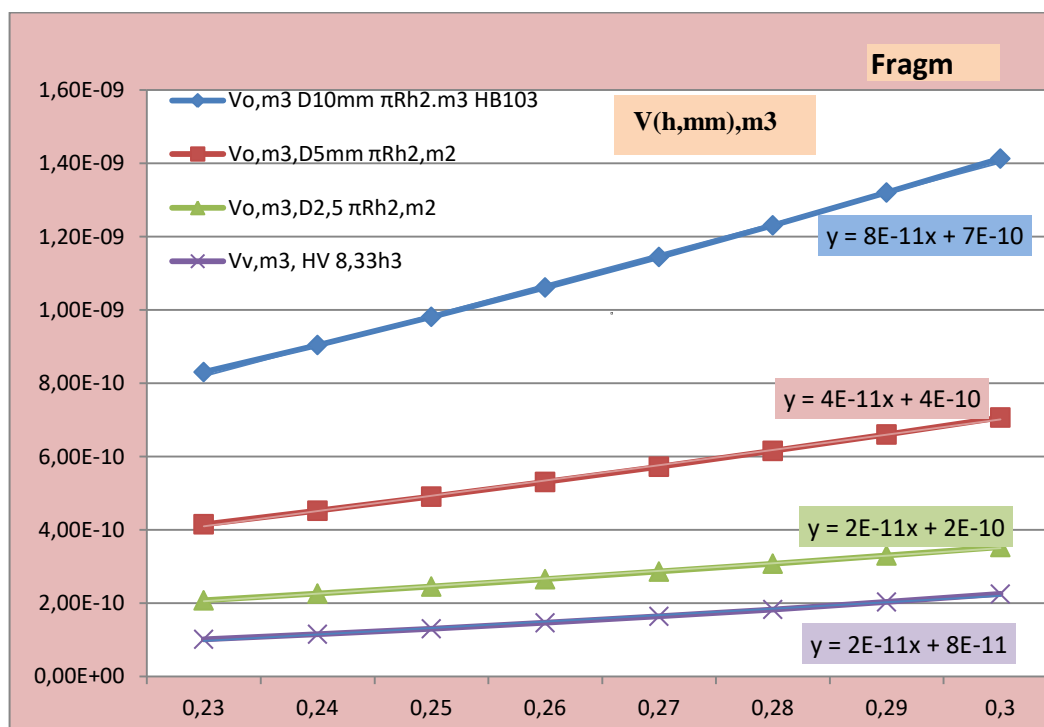
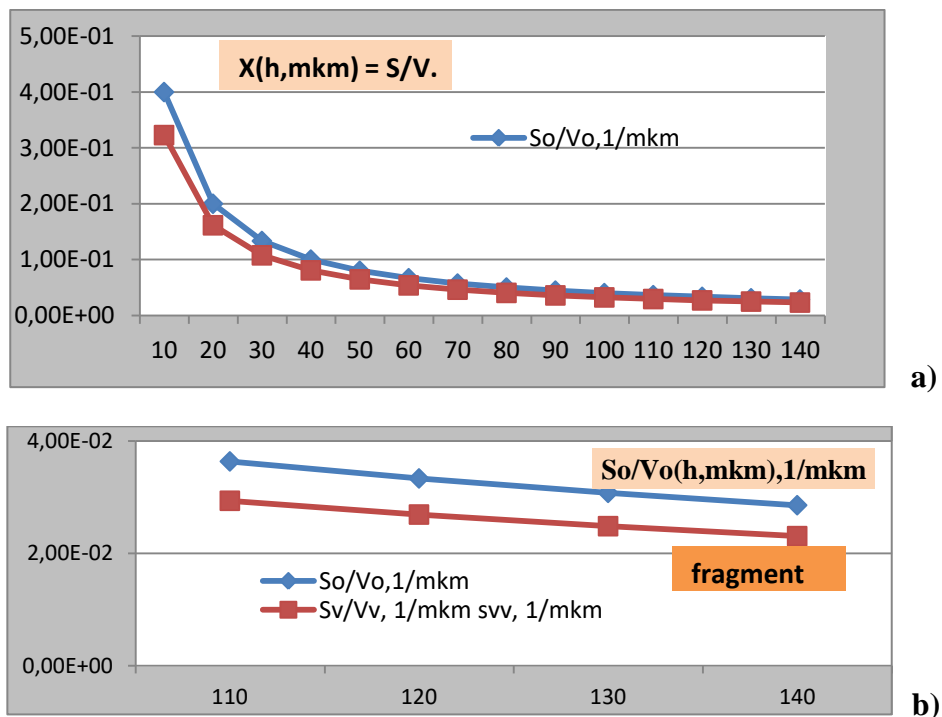


Рис. 23, Функции активированного объема сферы  $V_{oi}$  пирамиды Виккерса  $V_v$ .

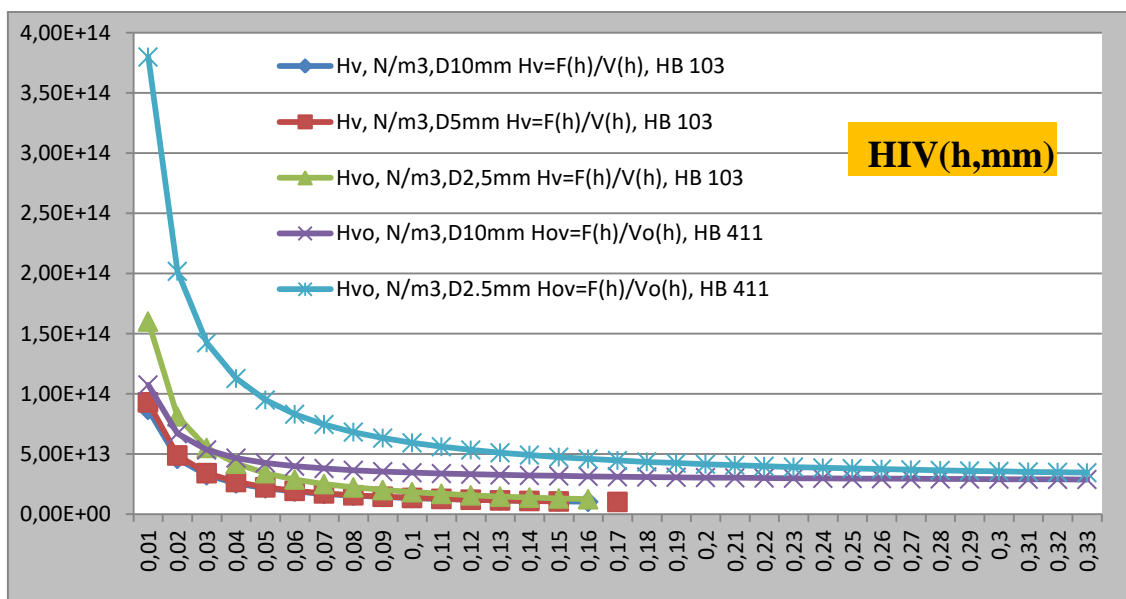


**Рис. 23.** Поведение функций объема активации  $V(h)$  для разных диаметров сферы D2,5/5/10mm и пирамиды Виккерса, для относительно больших  $h$ .

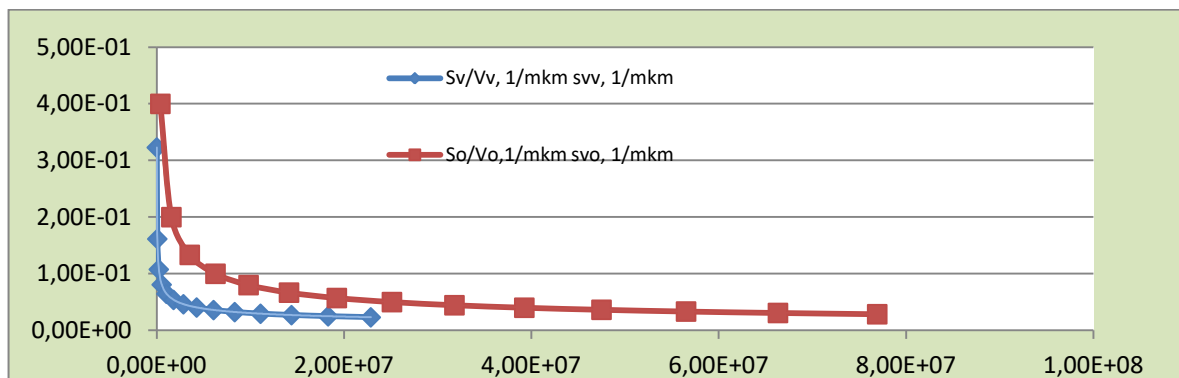
Приблизительно равный наклон графика объема  $V(h)$ , для сферы D2,5 и пирамиды Виккерса, означает приблизительно равные обобщенные скорости  $\dot{\epsilon}$  приращения объема индентирования, Рис.23. Отношение диаметров сферы D10/ D5=2.0, очевидна связь наклона прямой линии тренда объема  $V(h)$  вытесненного индетором. Соответственно уменьшился в два раза наклон (коэффициент) линии графика для малого радиуса. Все тренды имеют линейный характер на рассмотренном участке  $h=0,23-0,3mm$ .



**Рис.24.** Соотношение основных геометрических параметров  $v(h)$ ,  $s/v(h)$  индентирования сферой D2,5mm и пирамидой Виккерса в зависимости от глубины  $h, mm$ .  $X(h, mkm) = S/V$ .



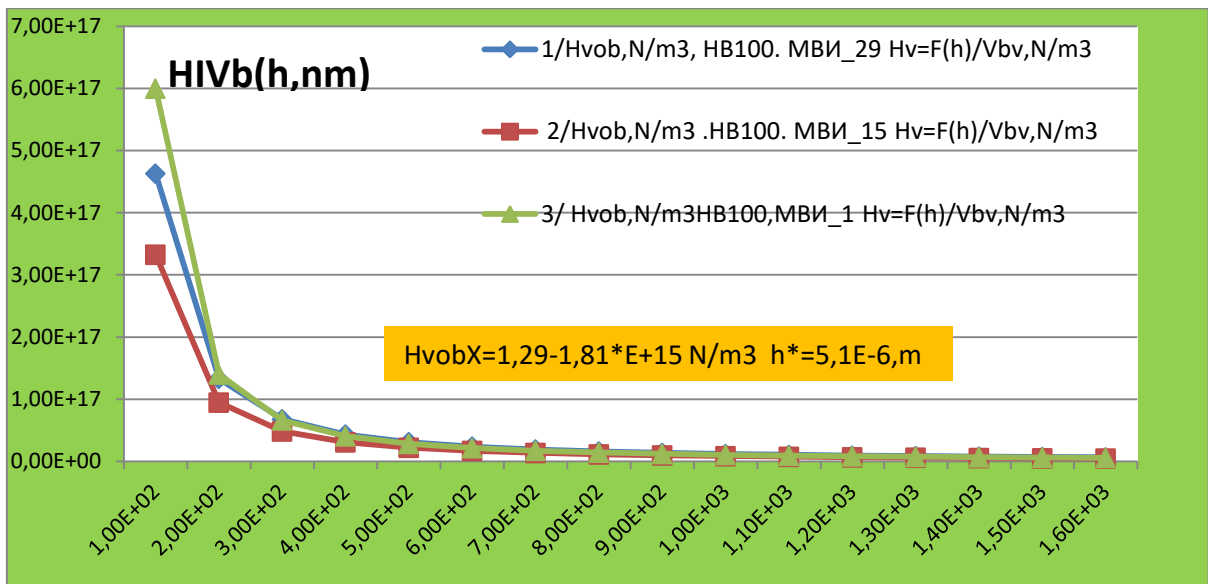
**Рис . 25** Результат расчетов функций объемной макро твердости  $HIV(h,mm)$  (Excel). Функции  $F(h)$  были построены полиномами [1]. Образцовые меры твердости HB103, HB411, диаметры сферы D2,5/5/10,mm, По данным профессора В.И. Мощенко ХНАДУ.



**Рис.25.** Зависимость удельной площади  $S/V$ ,  $1/m$ . от объема активированного материала  $V$ ,  $m^3$ , для индентора разной формы: o – сфера D2,5m, v – пирамида Виккерса.  $V, mkm^3$ .

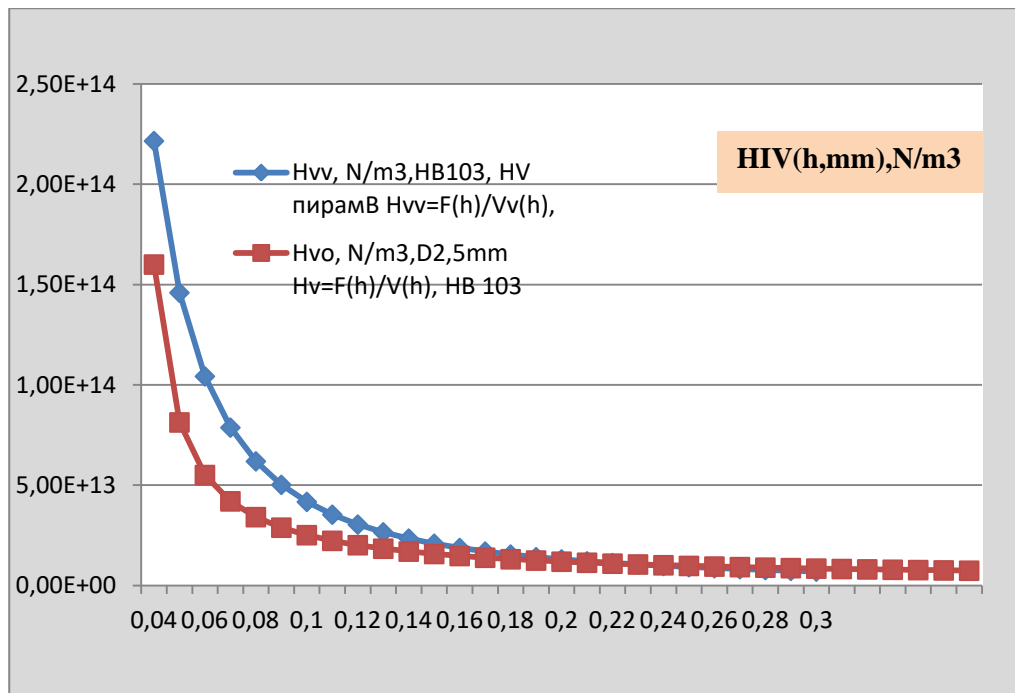
### Наноиндентор пирамида Берковича.

Графики объемной кинетической нанотвердости для индентора пирамида Берковича  $Hvb(h)$  Рис 26, получены в трех разных точках образцовой меры твердости HB100. Виден большой естественный разброс начальных значений. Объемная твердость макро индентирования образцовой меры HB100, по данным [1] около  $Hvo = 1 \cdot 10^{+13} N/m^3$ . Нано объемная твердость, для индентора Берковича  $HvbX = 1,510^{+15}$ ,  $N/m^3$ , на образцовой мере HB100 определена как асимптотика трех горизонтальных участков функций  $HI(h, nm)$ , после достижения стабилизации на глубине более  $h^* = 7.0E-6m = 700nm$ . Значение объемной макро твердости материала образца HB100, почти в 100 раз меньше, чем объемная нано твердость для индентора Берковича. Подобный результат получен для чисел поверхностной твердости макро и нано режимов. Физическая причина присутствия различия значений нано и макро твердости для одинаковых материалов обсуждаются в следующей части статьи.



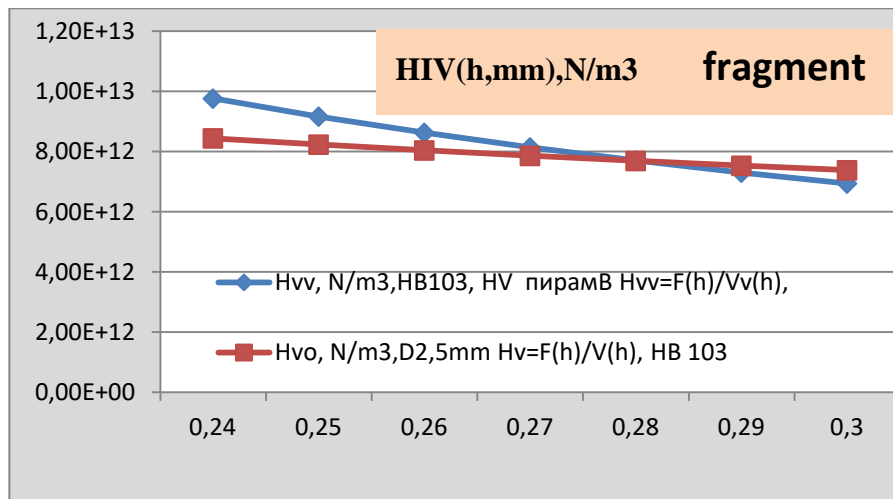
**Рис.26.** Характер функций кинетической объемной нанотвердости  $HIVb(h^*,nm) = 1,29 \div 1,8 \cdot 10^{+15} \text{ N/m}^3$ .

Начало стабилизации процесса  $h^* = 7 \cdot 10^{-6} \text{ m}$  ( $7 \cdot 10^{+2} \text{ nm}$ ). По данным профессора В.И. Мощенок ХНАДУ.

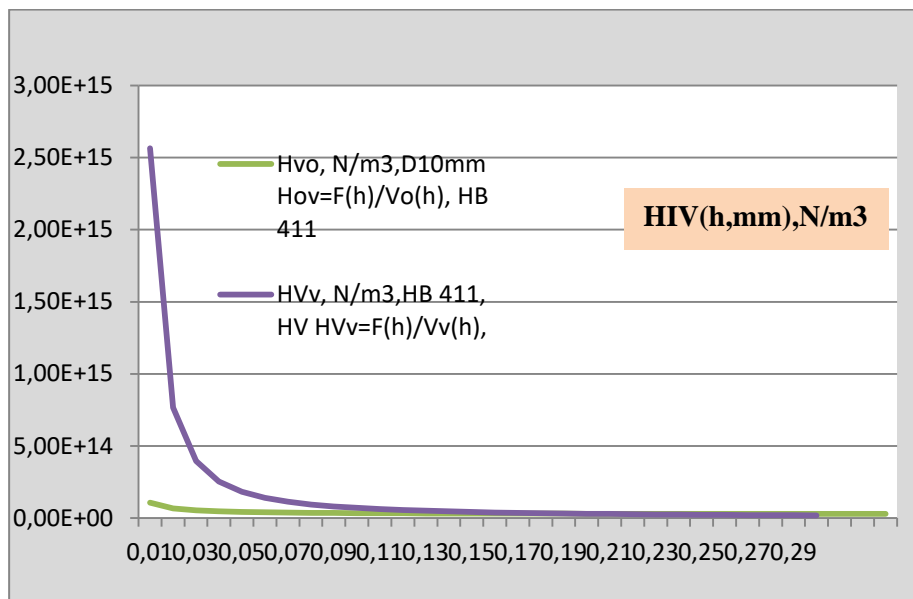


a)

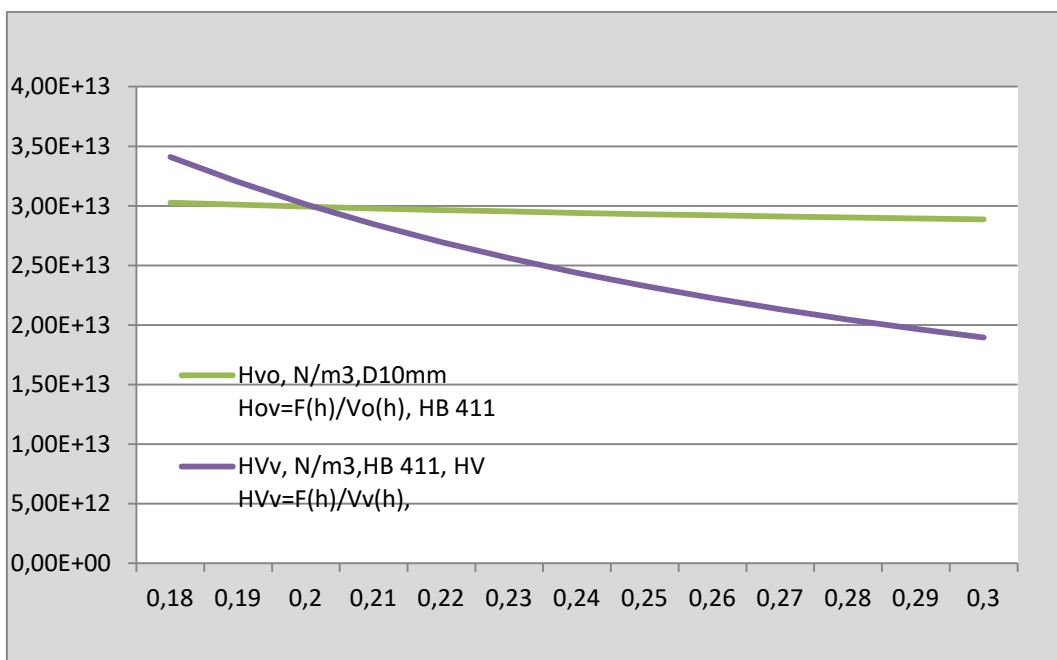




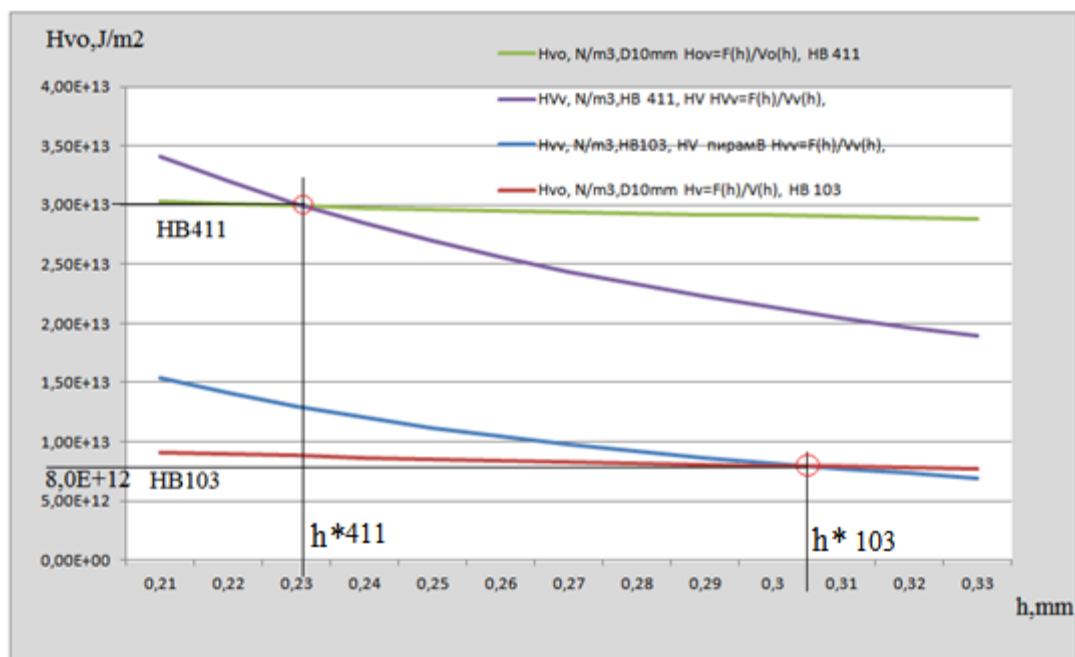
b)



c)



d)



e)

**Рис. 27** a,b,c,d,e, Графики объемной кинетической твердости  $HIV(h,mm),N/m^3$ : для сферы D10mm  $H_{vo}$ , пирамиды Вickers  $H_{vv}$  a) образцовая мера твердости HB103 b) – фрагмент графика a, d) образцовая мера твердости HB411, d) – фрагмент графика c; e) Точки пересечения графиков  $HIV(h)$  полученных разными инденторами, на двух мерах твердости HB103/411. Графики построены по данным силовых диаграмм полученных профессором В.И. Мощенок ХНАДУ.

На рис.27 показаны графики кинетических диаграмм объемной твердости относительной  $N/m^3$ , полученные на разных образцовых мерах твердости инденторами сфера D10mm и пирамида Вickers. Пересечение двух графиков  $HIV$ , испытания проведены двумя разными инденторами, на одной мере твердости, обозначено на рисунке e) точка  $h^*$ . Точку пересечения графиков, предположительно, рассматриваем как значение объемной твердости данного материала. Это значение легко определить аналитическими методами по данным испытаний разным инструментом индентирования.

### Обсуждение свойств объемной твердости $HIV$ .

Показатель объемной твердости остается эмпирическим, в признанных методиках и стандартах, нет определения твердости как физического процесса характеризующего необратимые изменения в материале. Объемная твердость, с ростом глубины, сглаживает влияние начального этапа релаксации особенностей поверхности и неоднородности структуры материала, инструмента.

Диаграмма объемной твердости  $HIV$  любой формы индентора постепенно выходит на период стабилизации. Показатели удельной энергии или работы (на единицу площади, единицу объема, см. пункт B) рассеянной на структурные преобразования материала сближаются, не зависимо от формы инструмента индентирования. Стабилизация процесса наступает при некоторой критической глубине  $h^*$ . Например, у сферы  $h^* = (0,01-0,1), D$  Рис.18, 22, 25. При уменьшении диаметра сферы растет значение относительной величины  $h_d^* = h^* / D$ . С ростом твердости материала также растет значение  $h^*$ . Для

пирамиды и конуса значение  $h^*$  больше чем у сферы при одинаковой твердости материала НВ.

Глубину  $h^*$  можно рассматривать начало стабилизации процесса индентирования или стабилизации формоизменения исследуемого тела. Эту величину можно определить по точкам пересечения графиков  $HIV(h)$ , для разных по форме инденторов. С точки  $h^*$ , предположительно, наступает условие равенства приращения физического и геометрического объема активации  $\Delta V_a = \Delta V_p$  на отрезке  $\Delta h$ . Обоснование аналитического метода определения точки  $h^*$  рассматривается отдельно.

Простыми методами аналитически построить обобщенную формулу  $HIV(h)$  не удалось. Аппроксимация имеет вид степенных функций. Параметры функций аппроксимации имеют большой случайный разброс значений, радикально влияет на них форма индентора. После выхода на асимптотики установившегося режима, горизонтальный участок, функцию  $HIV(h > h^*)$  можно аппроксимировать линейной зависимостью от  $h$ . Далее для разработки критерия твердости целесообразно исследовать установившийся режим.

О физических причинах повышенного значения твердости на начальном этапе индентирования для пирамиды относительно сферы. У пирамиды, **Рис.24**, в начале малая удельная плотность поверхности  $X_v$ , в 3-4 раза меньше чем у шара  $X_0$ . Соответственно твердость  $HIV$  в 3-4 раза выше НВ (обратная зависимость). Изменение удельного значения площади контакта для нано и микроскопических размеров индентора влияет мало на показатель твердости. Для макро режимов, изменение параметра  $X_{sv}$  существенно отражается на величине линейной скорости необратимых относительных деформаций  $\dot{\epsilon}_g$ , на линиях образующих контактную поверхность.

У шара Нор рост контактного давления за счет механического процесса движения индентора опережает рост контактной поверхности активированного объема материала заготовки (образца). У пирамиды (график  $HIV_{sp}$ ) механическая безразмерная скорость роста контактной поверхности больше скорости роста безразмерных напряжений (усилия). С ростом значения глубины индентирования, (начиная с  $h=100\mu\text{м}$ , для скорости индентора около  $1\mu\text{м/с}$ , диаметр шара  $2,5\text{мм}$ ) скорость механического роста поверхности и скорость пластического образования новой поверхности (скорость стационарной ползучести тела материала) сближаются асимптотически. В этот момент, предположительно, устанавливается квазиравновесный физический процесс формоизменения ДТТ, его характеристики могут основой для формирования физического параметра твердости. Это качество подробнее рассмотрим в физических параметрах индетирования. С позиции физики процесса, показательна точка пересечения двух линий экстраполяции, графиков функций объемной твердости  $HIV(h, \text{мм})$ , для индентора сфера и пирамида **Рис.27**.

### **Обсуждение результатов Сообщение А.**

Обширные экспериментальные данные и теоретические исследования указывают на тот факт, что работа индентора расходуется на образование новой поверхности и

формоизменение активированного объема с разной мощностью процесса. Мощность деформирования удельный показатель, имеет обратимый так и необратимый (пластическая деформация) характер и не равномерно распределяется по объему  $V_a$ , поверхности контакта. Структурные и физические особенности строения материала формируют внутренние структурно-энергетические физические поверхности  $S_p$  (границы) среды ДТТ. Это поверхности отражения, преобразования квазичастиц-волн энергии движения в макроскопической материальной среде частиц массы, энергии де Бройля. Эти явления обнаружены экспериментально, например работы Лихачева, Броуна, Мильмана. Задача заключается в выборе метода, параметров, критериев оценки влияния этих процессов, роли физических поверхностей – границ структурных энергетических состояний ДТТ. Механика деформированного твердого тела рассматривает деформации и разрушение внешней поверхности, границы макроскопического тела, представляя его как континуум (без учета микроструктуры тел). Модель «атомных связей» не дает необходимого результата в физике ДТТ. В этой связи целесообразна оценка взаимосвязи площади контакта  $S$  и других параметров процесса измерения твердости.

1. Анализ зависимостей твердости кинетического индентирования  $HI(h)=F(h)/S(h)$ , функций скорости роста поверхности контакта, объемной твердости кинетического индентирования  $HI_V(h)=F(h)/V(h)$  показал следующее. Число твердости, определяемое методами обычного механического и кинетического индентирования, является неустойчивой и неоднозначной характеристикой материала. В случаях изменения формы индентора (сфера, конус, пирамида и др.), изменения размера инструмента (например, рост подобной формы), возникают значительные перманентные изменения твердости по любой методике. Механизм формообразования изменяется по высоте (глубине) активированного объема, в радиальном направлении. Изменяются скорости компонент необратимых деформаций на растущей контактной поверхности (разные мощности разрушения структуры). На скорость влияют расстояние от поверхности, от оси движения, глубина перемещения и т.п. Эти изменения создают условия неконтролируемых отклонений показателя эмпирической механической твердости  $HI$  (возникает размерный эффект и др.) при изменении размера и формы инструмента индентирования.

Обобщение, анализ разных методов и инструментов индентирования, свойств механических чисел твердости, в том числе для кинетического индентирования показал, классический метод индентирования - эмпирический подход, лишенный физического начала. Этот подход, накопил методологические ошибки исходных гипотез. Подобное мнение изложено автором монографии по индентированию [1]. Во всех методах определения числа механической и кинетической твердости фактически, прямо или косвенно, использован показатель удельного среднего давления (напряжение). По существу этот показатель опирается на гипотезы континуума (отсутствие микрокоспического строения тел) и использует исходные гипотезы теории упругости (понятие напряжений и др.).

Фактически в современных методах индентирования число твердости отражает суммарный неоднородный, анизотропный и др. процесс необратимых изменений структуры материала и свойства взаимодействия формы поверхности контакта

инструмента (индентора) и некоторые механические характеристики испытательной машины (скорость инструмента, податливость и др.). Эти качества в эмпирическом подходе формируют реакцию всей системы, особенно в начальный период нелинейного роста усилия. Количество «свойств материала» в эмпирическом числе твердости не контролируется, отсутствует физический критерий оценки процесса. Автор монографии [1], на анализе различных инструментов видов индентирования, делает общий главный вывод, существующие стандарты, методы и меры измерения твердости не имеют единого и однозначного толкования физико-механического смысла величины эмпирической механической и кинетической твердости. Для совершенствования методов индентирования профессор В.И.Мощенок предложил [1] методику определения числа объемной твердости, которая открывает направление физического анализа объемного процесса индентирования. В этом направлении развиваются работы под руководством П.М.Огара [9]. В то же время, само число объемной твердости, как методология, остается на позициях эмпирического метода.

По моему мнению, коренной причиной, последовательного возникновения ошибочного эмпирического метода определения числа твердости являются несколько исторических моментов. Первоначально твердость основана на понятии континуума, в котором нет различий в свойствах распределения энергии упругой ( $W_e$  - обратимый процесс) и пластической ( $W_p$  - необратимые процессы) в объеме твердого тела. В этой связи понятие геометрического объема  $V_a$  активированного индентором ДТТ и фактически активированного физического объема  $V_p$  твердого тела (ФТТ) не разделялись. Предполагалась однозначная связь параметров функции  $V_a(h, S)$  и числа твердости. Априори сложилось представление равенства физического активированного индентором объема  $V_p$  и геометрического:

$$V_p = V_a.$$

Изменение формы инструмента, величины усилия на него, глубины индентирования исторически приводит к радикальным изменениям в соотношении упругих обратимых и необратимых процессов происходящих в объеме материала вытесненном индентом. При этом изменяются направления потоков структурных преобразований, плотность рассеянной энергии, удельная мощность и др. Используя терминологию [Лих] в ФТТ развивается трансляционно-ротационный механизм преобразований структурно-физических свойств. В результате возникают физические условия, при которых справедливо другое условие:

$$V_a \neq V_p$$

Для описания процесса индентирования необходимы новые физические критерии, параметры. Далее мы покажем, что для определения числа физической твердости достаточно определить количественные изменения, рост физического активированного объема и затраты удельной энергии на этот процесс. Нам необходимо установить связь этих величин с экспериментально контролируемыми параметрами, показателями процесса индентирования. При нано и микро индентировании роль неоднородности и анизотропии физических свойств тела, время процесса или скорость формоизменения существенно возрастают.

Энергетические и др. дополнительные специальные показатели в стандарте кинетического индентирования ISO 14577, существенно расширили объем контролируемой информации, но нового принципа определения физической меры твердости в стандарте нет. Отсутствует изначально физический критерий, следовательно, не может быть реализован корректный метод сравнения разных чисел твердости. Нет критерия подобия для разных методик испытаний. Контактное давление или условное напряжение, которое, по сути, присутствует в любом классическом и кинетическом показателе твердости, не является однозначной физической характеристикой состояния рассматриваемой термомеханической системы инструмент-машина - материал. Эмпирическая твердость находится в рамках теории континуума, теории упругости и классической механики ДТТ. В эмпирическом методе индентирования не хватает статистической, квантовой, волновой физики процессов происходящих в термомеханической системе и объеме материала при индентировании.

Основа эмпирики индентирования (по моему мнению) – укоренившееся допущение существования однозначной связи геометрических параметров: площади контакта, объема инструмента погруженного в материал образца и физических свойств материала противостоять вдавливанию индентора, разрушая при этом свою структуру. Соотношение силы индентирования и геометрических параметров не может объективно охарактеризовать сложный нелинейный термомеханический необратимый процесс взаимодействия инструмента и материала (ТМС), свойства преобразования, разрушения энергии структурного первоначального состояния материала.

Геометрические параметры поверхность  $S$ , объем  $V$ , в формулах твердости, представляют с точки зрения физики макроскопических систем (материал) не корректные характеристики. При кинетическом определении твердости материалов анализируют условные, приближенные геометрические параметры процесса. Следует искать новую модель индентирования, которая характеризует внутренний процесс необратимых изменений структуры, изменение прочности, физических параметров, поврежденности материала, разрушение атомных связей (классический термин физики твердого тела) и др. Нужны дополнительные физические характеристики материала. Нас интересует процесс в физическом объеме, в котором происходит работа разрушения структурных свойств: пластические деформации, ротация структурных свойств и массы материала, разрушение связей различной природы, влияющих на механическую прочность и физическую твердость.

Очевидна неоднозначность, неустойчивость показателя эмпирического механического и кинетического метода индентирования. Разный шарик, конус при равных проекционных площадках показывают разный показатель  $HI(h)$ , так же он зависит от абсолютного значения усилия. Кинетический метод использует энергетические параметры процесса, предоставил больше возможностей, но осталась не однозначность меры твердости, она порождает «размерный эффект». По существу «размерный эффект» это «методологический консерватизм» возникающий при сравнении разных физических процессов формоизменения тела при проникновении в него индентора. Необходимо установить общие физические принципы для разных методов индентирования.

Любой показатель механической твердости рассчитанный по формуле  $H=F/S$  (Бринелля, Роквелла и др.) по сути условное контактное давление, величина эмпирическая, не имеющая строго физического смысла. Принципиально не имеет значения, какая геометрическая величина площади  $S$  (контакта, проекции, с учетом прогиба или навала границы поверхности). Это корреляционная характеристика, которой можно пользоваться для сопоставления, сравнения свойств полученных одним инструментом (индентором). Изменение геометрии инструмента, скорости индентирования, температуры в активированном объеме, рост усилия, приводит к неконтролируемому изменению параметров физико-механического необратимого внутреннего процесса, изменению числа твердости материала. Доля собственных, структурно-физических свойств материала в числе эмпирической механической твердости нестабильна.

Стандартный механический и кинетический метод определения твердости по величине отношения усилия на индентор к накопленной суммарной площади контакта или вытесненному объему, в нано, микро, макро методиках, представляет некорректный средний результат за весь период процесса перемещения индентора. Функции усилия  $F$  и площади  $S$  нелинейные, от касания до заданного значения глубины. Эта средняя величина, нелинейная характеристика, существенно зависит от формы индентора, физических качеств материала (твердости и др.). Корректные результаты получаются только в частных случаях. Измерение твердости следует производить в состоянии стационарного процесса, когда величина изменения физических удельных параметров, работа, мощность индентирования, пропорциональны основным измеряемым параметрам глубина, усилие и др.

В то же время, индентирование, при всех теоретических недостатках, представляет оперативный распространенный, разработанный, приближенный метод *сопоставления физико-механических свойств* материала. Его применяют для контроля металлургических, технологических процессов (литье, прокат, термическая обработка, упрочнение, тонкие покрытия и др.), для оперативной оценки показателя прочности и т.п. Мы используем экспериментальные методы индентирования для определения новых обобщенных физических характеристик твердости, прочности, поврежденности, долговечности и др. сформировав критерий твердости физическими принципами.

### **Выводы.**

1. Числа поверхностной  $H=F/S$ , объемной  $H_v = F/V$  твердости и соответствующие этим показателям функции кинетического индентирования эмпирические характеристики процесса. В современных и классических методах индентирования отсутствует обоснованный однозначный физический критерий определения твердости, отсутствует обоснованная обобщенная (на разные типы индентора и др.) физическая модель процесса индентирования. Эмпирическое число твердости и кинетическая твердость, неоднозначные характеристики. При разных инструментах, с ростом глубины индентирования, создаются разные физические условия, механизмы процесса

необратимых разрушений структурных энергетических свойств материала как по поверхности  $S$  контакта, так и активированному объему  $V_a$ . Сравнение эмпирической твердости индентирования для разных инструментов и методов некорректно, сопоставляются разные физические процессы и условия формоизменения деформированного тела (распределение энергии, работа по объему материала, поверхности и др.). В разных эмпирических методах рассматриваются и сопоставляются результаты суммирования различных по их вкладу в реакцию (усилие) и физико-механические процессы разрушения структурно-энергетических свойств материала. При движении индентора в теле материала происходит смена характеристик плотности, мощности разрушительных необратимых процессов, как по поверхности  $S$  контакта, так и в активированном объеме  $V_a$ . Этот процесс изменений физических параметров неустойчивый и меняется нелинейно при изменении абсолютной величины активированного объема материала, геометрии активированного инструментом объема, движении индентора в твердом теле образца. Применение разных инструментов индентирования делает эмпирические методы и сопоставление чисел твердости некорректными.

2. Кинетическое индентирование следует разделить на несколько видов физических процессов формоизменения тела материала: 1. Ламинарное индентирование сферой относительно больших диаметров  $D_{2,5-5,0\text{mm}}$ , активационный объем больше некоторого предела  $V^*$ . 2. Индентирование коническими инденторами (пирамиды, конусы и др. с острой вершиной), совместный механизм формоизменения – присутствует одновременно макро и микроскопический процесс вызванный влиянием вершины концентратора индентора. 3. Нано индентирование любой формы инструмента. В активированном объеме величиной менее  $V^*$  присутствует высокая плотность энергии шарового тензора, доминирует трансляционно-ротационный механизм формоизменения тела. Удельная (объемная) мощность необратимых нано процессов существенно выше, чем в режиме ламинарного макро индентирования. Для сопоставления чисел нано и макро твердости, необходим специальный метод корреляции физических свойств индентирования (см. далее статью).

3. Эмпирическую механическую и кинетическую твердость целесообразно использовать для качественного сравнения, сопоставления показателей полученных инструментами одинаковой геометрии (размер, форма), при равных скоростях индентирования, равных температурных режимах в активированном объеме. Корректное сопоставление чисел твердости возможно только в рамках одного из режимов макро, микро, нано. Сопоставление разных режимов требует разработки приближенного метода сравнения, на основе физического подхода

В значении числа механической эмпирической твердости доминирует влияние формы инструмента. В кинетической твердости начальное влияние мощного и неустойчивого периода постепенно затухает при больших значениях глубины  $h$ .

4. Использовать механический или кинетический показатель эмпирической твердости для анализа и определения физических качеств, свойств материала некорректно.

5. Размерный эффект и т.п. явления неоднозначности в методах механического и кинетического индентирования результат отсутствия в их основе общего физического критерия определения твердости. При определении твердости индентирования разными



методами, возникают разное по удельным энергетическим и реологическим характеристикам физические процессы. Для сопоставления этих результатов необходимо создать соответствующий физический критерий, который позволит сформулировать принципы подобия, получить аналитические зависимости для выполнения количественного анализа эмпирических показателей твердости для разных методов, режимов и др. индентирования.

б. Для корректного сравнения разных методов оценки твердости необходимо сформулировать физические принципы индентирования и далее рассматривать условие подобия физических процессов необратимых изменений структурно-энергетических свойств материала. Измерение должно происходить в *стабильном или стационарном процессе* взаимодействия инструмента и материала образца.

## Литература

1. Мощенок В.И. Современные методы определения твёрдости. LAP Lambert. 2019. - 382с.
2. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. М.; Металлургия, 1983. 352 с.
3. ISO 14577-1:2002. Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Test method.
4. Соппротивление материалов. Под ред. Акад. АН УССР Писаренко Г.С. К. Вища школа. 1986. - 775с.
5. Харченко В. В., Рудницкий Н. П., Каток О. А., Неговский А. Н., Дроздов А. В., Кутняк В. В. Установка для определения механических характеристик конструкционных материалов методом инструментированного индентирования // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2007. – Вып. 27. – С. 140 – 147.
6. Машиностроительные материалы. Справочник. А.А.Жуков и др. Машиностроение. 1975г, 191с.
7. Определение твердости по Бринеллю методом инструментированного индентирования О.А. Каток, Н.П. Рудницкий, В.В. Харченко. ХНАДУ Вест. 54.2011.с.23-26.
8. Мильман Ю.В., Гринкевич К.Э., Мордель П.В. Энергетическая концепция твердости при инструментальном индентировании // Деформация и разрушение материалов. 2013. № 1. С. 2-9.
9. П.М. Огара, В.А. Тарасов, А.В. Турченкос, И.Б. Федоров Системы. Методы. Применение кривых кинетического индентирования сферой для определения механических свойств материалов. Технологии. 2013 № 1 (17) с. 41-47
10. Лихачев В.А., Малинин В.Г. Структурно-аналитическая теория прочности. Изд. Санкт-Петербург.1993г. 471с.
11. Иванова В.С., Рагозин Ю.И. О связи удельной энергии пластической деформации с напряжением при статическом растяжении. В сб. Усталость и вязкость разрушения

- металлов. Изд. Наука, Москва, 1974г. С. 220 -224.
12. Штырёв Н. А. Деформирование и разрушение твердых тел с позиций кинетической структурно-энергетической теории прочности. // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій. Збірник наукових праць 5-ї Міжнародної конференції під заг. ред. В.В. Панасюка. 2014, Львів. ФМІ, Україна, с 63-70.
  13. Штырёв Н. А. Деформирование и разрушение твердых тел при нестационарных нагрузках с позиций кинетической структурно-энергетической теории прочности. «Вибрации в технике и технологиях» ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев, №1(77) 2015г, с.55-61.
  14. Shtyrov N. Physical Methods and Parameters for Assessing the Strength, Fatigue, Durability and Damage to a Structural Material . Journal of Mechanics Engineering and Automation. № 9 (2019) , 84-91