

## Сообщение В. Физическая мера твердости материала, энергетический критерий подобия кинетического индентирования, универсальная шкала и единица измерения.

### 1. Концепция физической твердости.

Рассмотрим процесс индентирования с позиции физической структурно-энергетической теории прочности [14,15]. При движении индентора внутри области  $V_A$  происходит активизация интенсивных необратимых структурно-энергетических преобразований и формоизменение материала (см. часть А, Рис.1). В объеме  $V_A$  меняются физические параметры микроскопических состояний материала. Наблюдается ротация зон слабой и повышенной плотности энергии деформированного тела. Изменяется мощность микроскопических потоков переноса энергии волн-квазичастиц вызванных элементарными разрушениями взаимосвязей структурных единиц. С позиций механики ДТТ, с ростом глубины  $h$  и площади поверхности  $S$ , изменяется плотность энергии и расположение упругопластических зон. В геометрическом пространстве материала  $V_A$  активированным индентором формируется область высокой плотности энергии взаимодействия - физический объем  $V_p$ . В физической модели предполагается, что объем  $V_p$  обладает собственными однородными, изотропными (анизотропными) высокими термодинамическими и энергетическими параметрами. В физическом объеме происходят движение, ротация *структурных состояний* и элементарных масс, происходит трансляция пластических зон. В физическом объеме активации присутствуют и взаимодействуют волны-квазичастицы энергии необратимых разрушительных процессов активированных в  $V_A$  области ДТТ. Схематически этот процесс можно рассматривать как микро потоки движения вязкой жидкости. Движение и потоки в нашем случае относятся к энергетическим состояниям квазичастицам энергии среды. Данные процессы экспериментально обнаружены и частично исследованы в работах [10,16]. Изменение формы, размера индентора, перемещение, создают различные, неравномерные (во времени) и неоднородные по глубине, объему энергетические и силовые условия около поверхности контакта. Физический объем характеризуется значением плотности энергии необратимого процесса, контактным давлением, шаровым тензором. При определенных физико-механических условиях, физический объем  $V_p$  и активированный объем  $V_A$  могут быть равными. Особо важен, для анализа свойств физических процессов при измерении твердости, вариант состояния равных изменений (приращение  $\Delta A$  и  $\Delta V_p$ ). В общем случае это разные физические характеристики процесса индентированного материала. Одновременно мы используем величину условного активированного геометрического объема  $V_a$ . Эта величина рассматривается в привычных стандартных эмпирических методах индентирования одноактном и кинетическом. Это условная геометрическая характеристика, приближенная количественная мера процесса проникновения индентора в испытуемое тело. Краткое определение указанных величин.  $V_A$  – объем в котором присутствуют напряжения (упругая энергия), величина которых имеет практическое значение, при решении поставленной задачи (например прочности тела),  $V_a$  – геометрический условный объем замещенный индентором в испытанном материале,  $V_p$  - объем в котором присутствуют значимые для решения задачи необратимые структурно-физические, энергетические и термодинамические процессы.

Согласно физической теории [15], ДТТ можно представить как пространство, образованное множеством элементарных объемов, в каждом из которых происходят с определенной частотой колебания плотности энергии тела. Колебания плотности энергии, по величине и тензору анизотропии потоков, результат движения, взаимодействия и преобразования энергии волн-квазичастиц де Бройля. Периодический процесс отклонения плотности энергии от некоторого среднего уровня в элементарном объеме называется - характеристическая разрушительная флуктуация CFL (characteristic fluctuation). Энергия волн-квазичастиц в этом элементарном объеме колеблется относительно некоторых средних параметров равновесного состояния макро системы. Энергия волн квазичастиц характеризует единый физический процесс взаимодействия полей температуры и механических напряжений в ДТТ. Корпускулярно-волновая макроскопическая квазиравновесная термомеханическая система ДТТ образуется из CFL, которые можно рассматривать энергетические физические атомы среды. Таким образом, материальная среда в квазиравновесном термомеханическом состоянии, представляет одну трехмерную матрицу (или несколько) образованную элементарными энергетическими молярными ячейками CFL[15]. Периодические флуктуации, колебания плотности энергии CFL, происходят за счет одновременного движения входящего и исходящего потоков энергии волн-квазичастиц де Бройля. Входящий поток формирует потенциальную энергию. Исходящий поток – кинетическую энергию квазичастиц. Таким образом, CFL представляет диполь двух разноименных потоков корпускулярно-волновой энергии. Потоки энергии заключены в элементарном молярном объеме. Параметры CFL это одновременно термодинамические (температура, напряжение или давление) и статистические микроскопические характеристики среды (число структурных единиц, элементарная масса единицы, количество волн-квазичастиц энергии де Бройля, и др.). В целом система характеризуется физической величиной, функцией состояния – молярной энергией  $W_L$ , J/mol, молярным потенциалом  $Gr$ , J/mol и др. ДТТ в квазиравновесном состоянии - матрица из CFL, с определенными параметрами энергии волн-квазичастиц: частота, амплитуда, длина волны и др. Флуктуации CFL имеют обратимый и необратимый характер. Необратимые флуктуации разрушают установившиеся ассоциированные потоки микроскопического движения волн-квазичастиц энергии де Бройля в объеме тела. В классической формулировке атомарной механики потоки микроскопической энергии можно представлять как «механические связи» между атомами. Необратимые процессы разрывают « атомные связи». Необратимые флуктуации разрушают энергетический корпускулярно волновой физический атом системы. При этом энергия объема трансформируется в энергию поверхностных волн-квазичастиц. Энергия Гиббса объема тела, преобразуется в поверхностную энергию, в корпускулярно-волновом эквиваленте. При этом возникает физическая (волновые границы среды) или внешняя элементарная механическая свободная поверхность (микродефекты строения тела). Обобщенными координатами для физического объема (пространства элементарных энергетических состояний) являются термодинамические параметры температура, давление, напряжение. Дополнительные энергетические характеристики такой системы, плотность молярной энергии, поток, вектор, ротор и др. Элементарные неравновесные энергетические процессы в элементарных объемах ДТТ аналитически показаны через свойства CFL -характеристических флуктуаций энергии. В макроскопической квазиравновесной термомеханической системе ДТТ непрерывно

происходит обмен энергией между малыми элементарными объемами. Каждый элементарный объем такой физической системы обладает средними физическими устойчивыми параметрами, которые зависят от свойств материала, температуры, напряжений. Все параметры состояния системы определяются экспериментально-аналитическими методами, пример такого решения в [14].

В пластической области ДТТ необратимые разрушительные флуктуации происходят с высокой плотностью энергии на единицу объема, в сравнении с упругой областью, где преобладают обратимые процессы обмена энергией CFL. При индентировании, в объеме  $V_a$ , активируются необратимые разрушительные процессы большой удельной мощности. Высвобождается большая энергия в малых объемах за короткий период времени. В общем случае распределение мощности по объему  $V_a$  неравномерное. Распределение энергии зависит от формы поверхности индентора, структуры и физических свойств материала. Макроскопическое количество характеристических флуктуаций образует в физических координатах термомеханическую квазиравновесную систему (TMS - thermomechanical system), в терминах механики это объем ДТТ.

По определению, предложенному Новиковым И.И. в теории термодинамики, [18], напряжения, давление представляют потоки работы, подобно потокам тепловой энергии. Макроскопическое количество характеристических флуктуаций образует термомеханическую квазиравновесную систему потоков энергии волн-квазичастиц. Следовательно, ДТТ как TMS представляет поле потоков энергии механических напряжений и температурного поля. Согласно СЭТ напряжения это анизотропные потоки волн-квазичастиц, которые можно разделить на микроскопические потоки (на уровне структурных единиц) и далее они образуют поля макро потоков обычных напряжений, тензор и др. (теория упругости). Температура – изотропные потоки микроскопической работы, которую так же производят волны-квазичастицы де Бройля. Характеристические необратимые флуктуации большой энергии ДТТ, возникающие при индентировании, можно представить как физический активированный объем  $V_p$ , м<sup>3</sup>. Физический объем TMS  $V_p$  при индентировании имеет свои параметры, собственную границу поверхности физического активированного пространства  $S_p$ , внутреннее поле напряжений, шаровый тензор и др. Физический активированный объем наблюдается экспериментально как пластическая зона [19]. Движение и трансляция потоков энергии при разрушении структурных состояний материала обнаружили экспериментально [10,16]. Сама граница (как слой)  $S_p$  физического активированного состояния - относительно малый объем с высоким градиентом мощности разрушительных процессов, анизотропией и градиентом плотности упругой энергии. На физической границе происходят отражение, преобразование энергии волн-квазичастиц де Бройля. Это явление известно в методах акустической эмиссии, используется для обнаружения повреждений, дефектов и др. Геометрические параметры индентирования  $V_a$ ,  $S_a$  и физические параметры активированного объема  $V_p$ ,  $S_p$ , в общем случае не равны:

$$V_p \neq V_a, \quad S_p \neq S_a$$

Физический объем  $V_p$ , равен геометрическому объему, который занимают в пространстве характеристические флуктуации CFL, при заданных термомеханических параметрах  $\beta$ ,  $T$  тела. Это флуктуации с энергией необходимой для разрушения

равновесного состояния в элементарном молярном объеме данного структурного и физического термомеханического состояния материала. Количество разрушительных флуктуаций  $N_p$  в физическом объеме  $V_p$  прямо пропорционально работе  $A_{pl}, J/m$  затраченной на формоизменение геометрической формы тела при индентировании:

$$N_p = A_{pl} / W_r \quad (1)$$

Где,  $W_r, J/un$  - энергии элементарного акта CFL.

Количество разрушений  $N_p$  позволяет определить физический активированный объем  $V_p$  для заданных термомеханических параметров состояния ДТТ. Зависимость (1) устанавливает связь геометрических параметров  $V_a, S_a$  и работы затраченной на разрушение структуры материала в объеме  $V_a$  при индентировании. По стандарту ISO 14577, это  $W_{pl}, J$  - пластическая составляющая работы индентирования.

Физический объем макроскопической системы характеризуется определенными статистическими, термомеханическими параметрами: температура  $T, K$ , давление  $P, Pa$  напряжение  $\sigma, Pa$ , удельная энергия и др. Нас интересует связь физического активированного объема  $V_p$  с условным активированным геометрическим объемом  $V_a(h)$  и физической твердостью. Рассмотрим эту связь используя зависимости площади внешней поверхности тела  $S_A(t)$  от линейных относительных деформирований  $\epsilon_r$ .

Из анализа физико-механических свойств ДТТ, для пластически деформируемого материала, получена экспериментальная зависимость, для расчета количества свободной поверхности пластически деформируемого образца (например, цилиндрического):

$$\epsilon_A = \frac{\Delta S_A}{S_{0A}} = \epsilon_r (1 - \mu - \mu \epsilon_r) \quad (2)$$

Где,  $\epsilon_A$  - относительное изменение площади  $S_A(t)$  свободной поверхности цилиндрического образца при необратимом пластическом деформировании, сохраняя условие неразрывности среды.  $\Delta S_A(t)$  - приращение площади образца.

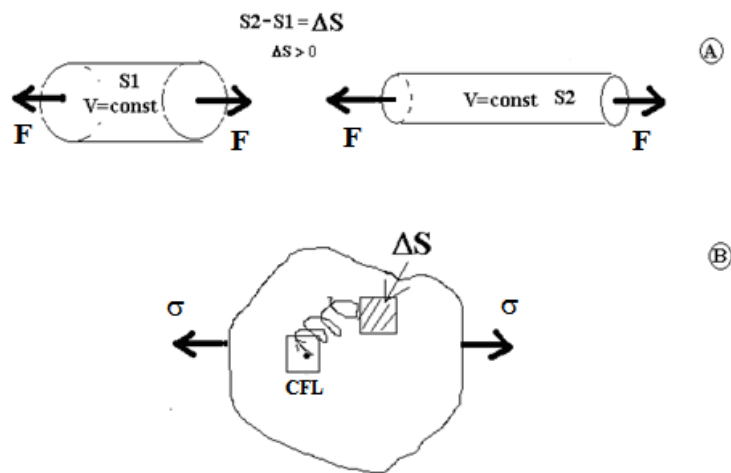
$S_0$  - начальная площадь поверхности. Формула (2) означает, что пластически удлиненный образец, при сохранении объема материала (нет пустот), необратимо увеличивает свободную поверхность. Так при деформации  $\epsilon_r = 1, \mu = 0,3$  площадь поверхности вырастет на 0.4 раза.

В физической теории прочности [13] получена зависимость между необратимыми деформациями поверхности тела и структурно-энергетическим молярным потенциалом материала  $Gr, j/mol$ . Эта зависимость определяет связь между изменением плотности энергии в объеме ДТТ и необратимым изменением площади поверхности. Таким образом, приращение площади внешней свободной поверхности  $S_A$  деформируемого твердого тела (в т.ч. площадь дефектов) зависит от процесса необратимых разрушений, количества необратимых разрушительных флуктуаций CFL:

$$dS_A = \frac{1}{\delta_S} dGr, \quad (3)$$

где  $dS_A, m^2/mol$  – элементарная удельная площадь образованной свободной поверхности в деформируемом твердом теле,  $Gr, J/mol$  - структурно-энергетический молярный

потенциал материала,  $\delta_S$ ,  $\text{J/m}^2$  – реологический коэффициент поверхностного натяжения, определяется из экспериментов на разрушение разных по размерам образцов



**Рис. 1** Образование новой свободной граничной поверхности растянутого стержня  $\Delta S > 0$ . А – рост поверхности  $S$  стержня при пластическом растяжении. В - Разрушение физического пространства волнового равновесия энергии в элементарном объеме при необратимой флуктуации CFL. Образование элементарного разрушения: пора, дислокация, вакансия, микротрещина и др.

Зависимость получена на основании уравнения Харта [20] и теории границ фаз Гиббса. Таким образом, необратимое изменение молярного потенциала  $G_r$  ДТТ однозначно связано с ростом внешней поверхности этой системы.

На Рис.1 показана модель физического процесса образования элементарной новой поверхности макроскопической системы от разрушительной флуктуации CFL. Показан процесс высвобождения энергии элементарного малого объема находящегося в составе равновесной макроскопической системы. Поверхность стержня увеличивает энергию. Это происходит за счет энергии освобожденной при необратимых разрушениях элементарных равновесных состояний движения волн-квазичастиц в микроскопических элементарных объемах стержня. Происходит переход внутренней энергии структуры тела в иную форму движения энергии волн-квазичастиц на поверхности. CFL - элементарный акт увеличения энергии поверхности и одновременный рост поверхности на элементарную площадку  $dS$ . Поверхность  $S$  - граница макроскопической системы, особая волновая структура движения квазичастиц энергии. В результате внутренних необратимых разрушительных корпускулярно-волновых процессов активированный индентором объем генерирует новую физическую, материальную внешнюю поверхность. Внешняя поверхность далее называется поверхность 1-го рода. Внешняя поверхность отражает волны де Бройля, энергия возвращается внутрь тела. Поверхность 1го рода, обозначается  $S_p$ , ограничивает движение потока энергии квазичастиц в телесном угле  $2\pi$  (по одной координате трехмерного тензора). Выход энергии на свободную микро или макро поверхность тела однозначно связан с увеличением площади внешней или внутренней границы среды (дефект). Физическая площадь поверхности ДТТ при формоизменении (необратимых деформациях) всегда растет  $\Delta S > 0$ . Подобно энтропии открытой термодинамической статистической системы, величина площади физической поверхности системы монотонно возрастающая величина, с течением процесса она растет. Если равновесное состояние

макросистемы необратимо нарушено, поверхность системы увеличивается. Для твердого тела в этом процессе не имеет значение знак напряжений, это следует из теории границ Харта-Гиббса .

Из физической теории следует, что количество поверхности образующейся при необратимых структурных изменениях материала в данном структурно-физическом состоянии однозначно связано с количеством удельной энергией потраченной на этот процесс. Удельная энергия, потраченная в процессе роста поверхности и формоизменения ДТТ, может служить объективной характеристикой физической твердости материала. Для использования этого свойства необходимо установить связь между образованием физической  $S_p$  и условной геометрической  $S_a$  поверхностью индентирования и работой индентирования:

$$S_a \sim S_p \sim W_{pl}.$$

Определить связь роста условного  $V_a$  и физического  $V_p$  активированного объема, с работой индентирования, используя кинетические диаграммы индентирования:

$$V_a \sim V_p \sim W_{pl}.$$

В другой статье мы рассмотрим эти свойства подробнее, покажем, как определить приращение числа необратимых элементарных разрушений  $\Delta N_p$  в объеме деформированного индентором тела. Определим работу, совершенную на единицу активированного объема  $V_a$  , при условии стационарного процесса формоизменения. Таким образом, **концепция физической твердости** заключается в следующем.

Необратимые структурно-энергетические преобразования ДТТ при индентировании зависят от работы внешних сил, которая необходима для разрушения начальных физических структурно-энергетических свойств в единице объема материала при формоизменении и образовании свободной поверхности материала. Работа индентирования, при определенных физических и механических условиях (метод, инструмент и др.), рассматривается как объективное, индивидуальное физико-механическое свойство некоторого объема данного материала. Для этого энергию объединенного упругопластического (обратимого и необратимого) процесса следует измерять в строго определенном объеме (удельный показатель) и в определенном физическом процессе формоизменения тела. Следует установить *физическую меру* процесса (алгоритм). Рассмотрим определенную форму индентора, скорость движения инструмента, температуру, начальные условия. Определяем необходимые требования, условия, соотношение контролируемых параметров или коротко физическую меру процесса индентирования. В частности: работу индентирования  $A, J$ ; физический объем в котором происходит формоизменение исследуемого тела при индентировании  $V_p$ ; количество генерированной данным объемом поверхности тела  $S_p$  (площадь контакта). Далее определяем экспериментально удельную энергию  $PVA=A/V_p$  ,  $J/m^3$ , затраченную на указанный процесс индентирования, определим удельную площадь генерированной поверхности  $\Delta S_p/\Delta V_p$ . Определим физические условия эксперимента индентирования, при которых изменение условных геометрических параметров, поверхность  $S_a$  и объем  $V_a$  активированного материала, будут однозначно (или максимально близко к этому требованию) связаны с характеристиками изменения физических параметров индентированного тела:  $\Delta A$ ,  $\Delta S_p$ ,  $\Delta V_p$ .

Затем, определим условия, при которых процесс кинетического индентирования методом ISO 14577 удовлетворяет критериям измерения нужных нам параметров и в целом физической твердости. Для этого рассмотрим свойства функции  $PVA(h)$  - плотность энергии объемного кинетического индентирования, параметры и функции  $Va$ ,  $Sa$  и  $Vp$ ,  $Sp$  и их производные в процессе кинетического индентирования разным инструментом и др.

## **2. Физический объем и поверхность материала активированного обратимым и необратимым процессами, происходящими при индентировании.**

Эта часть статьи посвящена специалистам интересующимся моделью физических процессов происходящих в материале при индентировании.

Объем  $Va$  посчитан по формуле геометрии, в предположении несжимаемости перемещенного при движении инструмента материала. Геометрический объем отображает идеализированные свойства континуума и несжимаемости среды. Мы рассмотрим модель физической среды ДТТ как термомеханической статистической корпускулярно-волновой системы. В физическом объеме такой системы при индентировании изменяются её структурно-энергетические свойства и контролируемые параметры. Физический процесс выдавливания, пластического деформирования связан с изменением структурно-энергетических характеристик (SES, structural energy state), ротацией структурно-энергетических свойств тела, трансляцией структурных состояний частиц массы (атомов, кластеров и др.) вещества [10]. Перемещение массы тела, перенос, разрушение и трансляция структурных свойств, различные физические процессы, это необходимо учесть при определении твердости. Изменение разной формы инструмента вызывает изменения свойств физического процесса в вытесненном объеме тела. При индентировании меняется соотношение областей упругих (обратимых) и необратимых процессов, скорость формирования поверхности контакта, объем перемещенного материала. Изменяется удельная мощность необратимых процессов по объему  $Va$ . Сравнение поведения функции геометрического объема  $Va(h)$  и функций силы  $F(h)$ , на одинаковом материале, показывает, механическая твердость существенно зависит от формы инструмента, особенно на начальном этапе релаксации материала к нагрузке индентора.

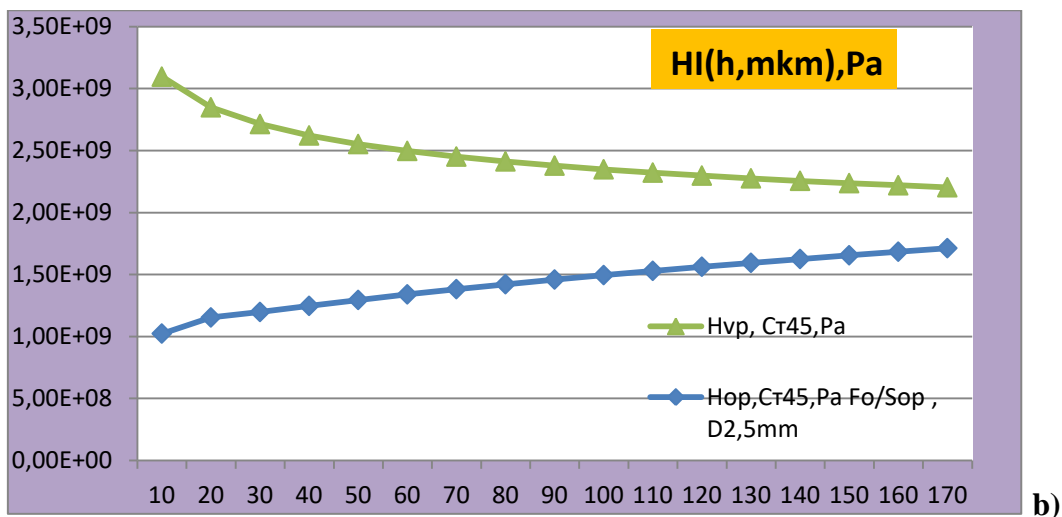
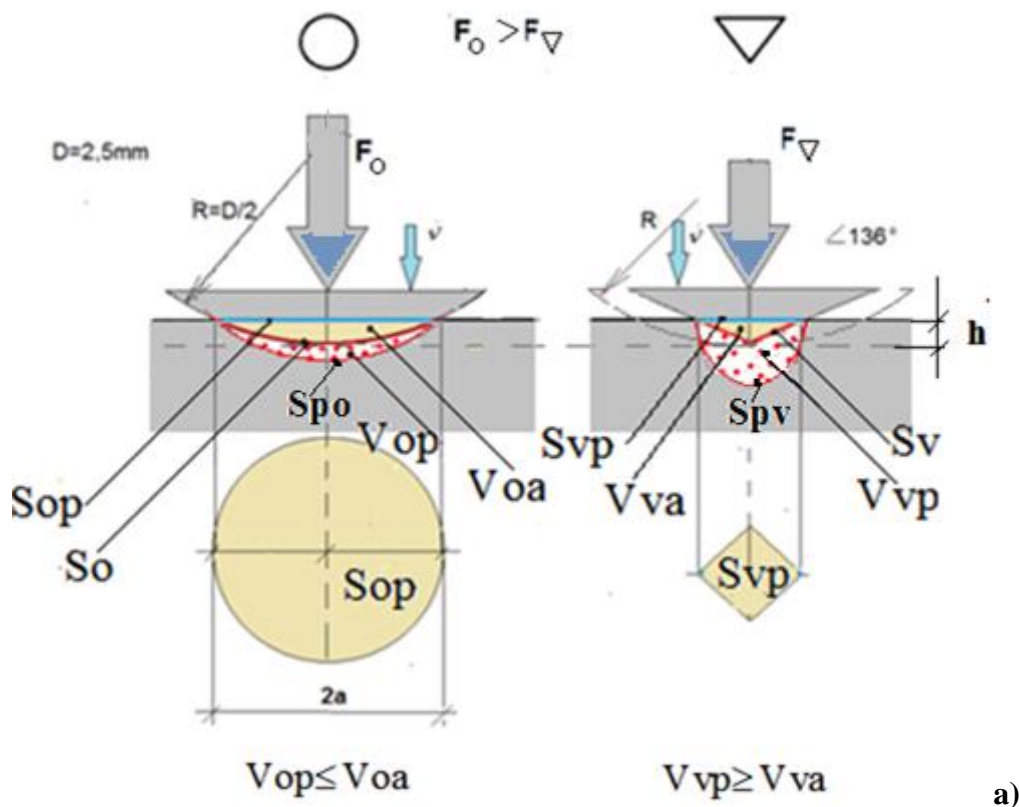
В качестве главного внутреннего механизма микроскопических физических структурных процессов мы используем обратимые и необратимые разрушительные флуктуации равновесного состояния макроскопической статистической термодинамической системы из элементарных структурных единиц ДТТ. Обмен энергией в такой системе происходит посредством квазичастиц-волн. Необратимые флуктуации характеризуют необратимые процессы разрушения ассоциированных корпускулярно-волновых взаимодействий (в атомарной модели ДТТ «разрыв связей») между структурными единицами тела. Одновременно, в результате необратимых флуктуаций, образуются элементарные свободные поверхности различных вихревых волновых структурных состояний материала (например, дислокации). Картина микроскопических корпускулярно-волновых процессов - физическая структура материала. Элементарные свободные поверхности – элементарные дефекты (дислокации, вакансии, сдвиги SE и т.п.), результат указанных процессов в любых материальных средах. Элементарные дефекты накапливаются, образуя внутренние или внешние макроскопические

поверхности физических волновых вихревых состояний ДТТ. Совокупность элементарных поверхностей формирует дефекты, трещины и макро поверхности тела (свободные или контактные). В нашем случае индентирования, рассмотрена свободная поверхность обозначается как физическая поверхность  $S_p$ , у которой движение потоков энергии волн де Бройля в направлении нормали к данной поверхности, невозможно. Отсутствует поток энергии волн-квазичастиц по данной степени свободы (координате) трехмерного ортогонального тензора. Энергия квазичастиц движется внутри физического тела и по его поверхности тела.

В физическом активированном объеме происходят экспериментально наблюдаемые процессы разрушения потоков волн – квазичастиц энергии или ассоциированных взаимодействий структурных единиц твердого тела. В классических терминах механики разрушения ДТТ - разрыв атомных связей. Процессы происходят с относительно высокой локальной удельной мощностью, с определенной частотой разрушительных актов, энергией, вектором потока и др. Кратко, можно сказать, физический объем деформированного тела  $V_p$  образован разрушительными флуктуациями, он формируются из квазичастиц-волн де Бройля большой энергии [ Ш]. Эти мощные флуктуации способны взаимодействовать. Они формируют физический объем и его волновую внутреннюю или внешнюю физическую поверхность ДТТ с большой (относительно среднего значения) плотностью энергии. Пример физического активированного объема - пластическая область ДТТ в малом объеме у концентратора растянутого стержня. Пластическое деформирование всегда сопровождается образованием свободной физической поверхности ДТТ.

Применим для нашей физической модели формоизменения величину  $V_p$  формально. Свойства  $V_p$  рассматриваются подробнее в физической структурно-энергетической теории прочности [ ш ]. Формально введем понятие площадь поверхности физического активированного объема  $S_p, m^2$ . На Рис. 2а, схематически, показан физический объем  $V_p$  и условный объем  $V_a$  для сферы и пирамида Виккерса. На Рис.2б показана кинетическая диаграмма твердости индентирования для данных типов инденторов. Разные инденторы, на начальной стадии индентирования, формируют различные по величине, форме объемы  $V_p$ . Обозначим  $V_{p0}$  – сфера,  $V_{pv}$  – пирамида (конус). В физической теории прочности ДТТ [12,13] физическая поверхность  $S_p$  - граница контакта разных по физическим параметрам волновых энергетических состояний среды. Физическая граница разделяет микроскопические объемы с разной плотностью энергии и разными параметрами потоков движения (разный вектор, ротор и др.). Эти потоки вызваны элементарными (атомарного уровня) разрушительными необратимыми процессами.





**Рис.2: а)** Активированный объем индентирования твердого тела. Физический  $V_p$  и условный геометрический объем  $V_a$  материала. Физическая  $S_{po}$ ,  $S_{pv}$  и условная геометрическая  $S_o$ ,  $S_v$  поверхности активированного объема. Сфера  $D2,5mm$  и пирамида Виккерса изображены в одном масштабе. Индексы внизу:  $o$  – сфера,  $v$  – пирамида. Второй нижний индекс  $S_{vp}$ ,  $S_{op}$  обозначает проекционные площади контакта в расчетах твердости; **б)** кинетические диаграммы поверхностной твердости  $HI(h)$  Нижняя кривая сфера  $D2,5mm$ , верхняя кривая пирамида Виккерса. На основании экспериментальных диаграмм для стали [5].

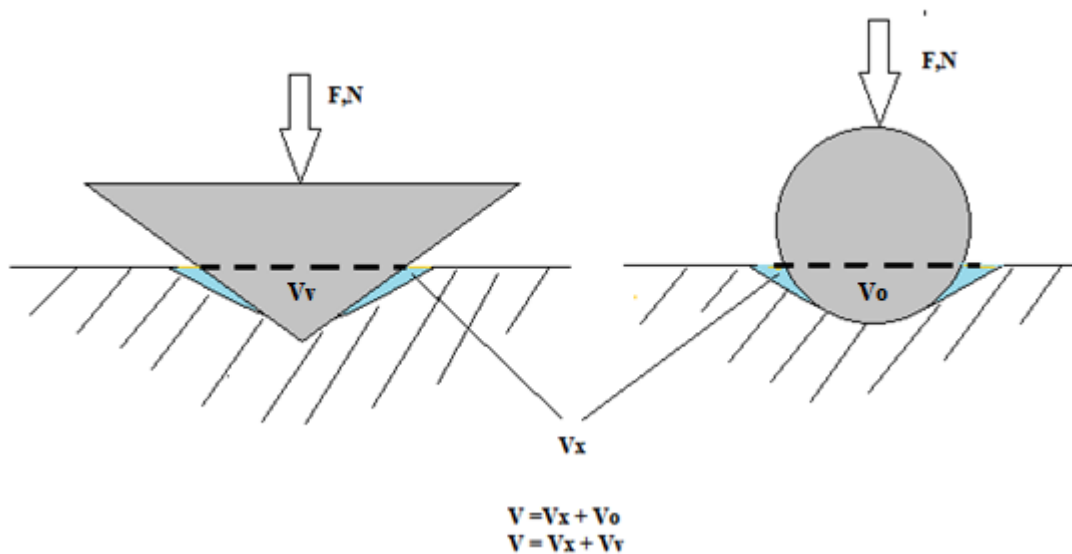
Подобным образом в твердых и жидких средах на границах их структурных, фазных и т.п. состояний, происходит преломление, отражение, преобразование волн звука, ударных волн, магнитных и др. При больших градиентах плотности энергии ДТТ физическая граница препятствует, изменяет поток энергии волн-квaziчастиц, которыми наполнен объем. Экспериментальные и теоретические исследования физических процессов

пластического формоизменения материала подтверждают существование таких процессов [10]. Физическая граница - физическая микроскопическая область, которая условно разделяет пластическую и упругую область ДТТ, посредством разных параметров корпускулярно-волновых параметров энергии в объеме тела

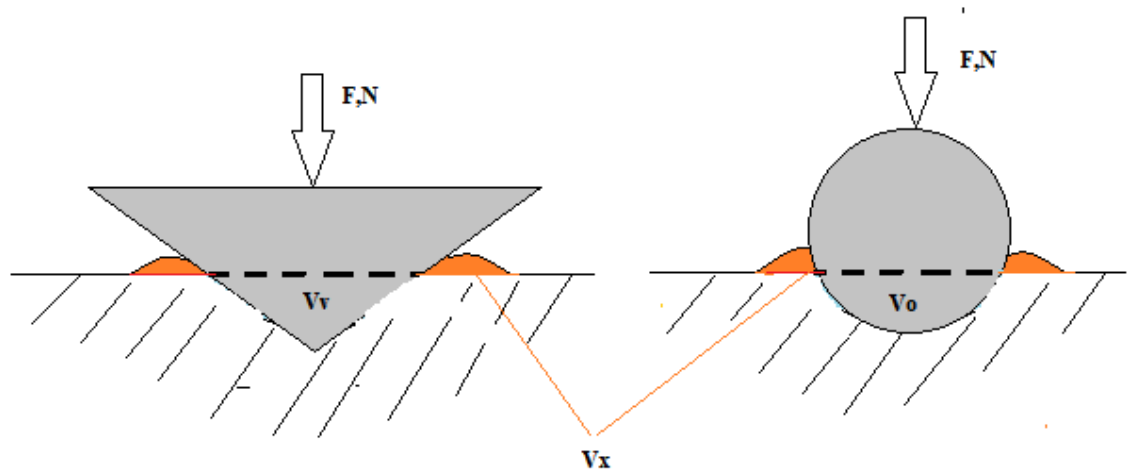
Возникновение физической границы раздела различных по энергетическому состоянию активированных областей наблюдаются экспериментально. На Рис. 3 показаны схематически различные характерные варианты образования реальных форм физической поверхности и вытесненного объема материала, для индентора разной формы. Для двух случаев, схематически показаны свойства экспериментального процесса взаимодействия разной формы индентора с материалом. Схемы построены на основании анализа экспериментальных данных [1] и теоретических расчетов поля деформаций [19]. Реальная форма объема индентированного материала  $V$  отличается от идеализированной условной геометрической формы  $V_0, v$  (сфера, пирамида). Это отклонение показано формулой:

$$V = V_x + V_0, \text{ где } V_x - \text{отклонение объема от идеальной формы.}$$

Очевидно, что присутствие отклонения  $V_x$ , означает, что геометрический условный объем  $V_0$  в некоторых случаях будет неверно отображать процесс изменения формы перемещенного материала.



a)

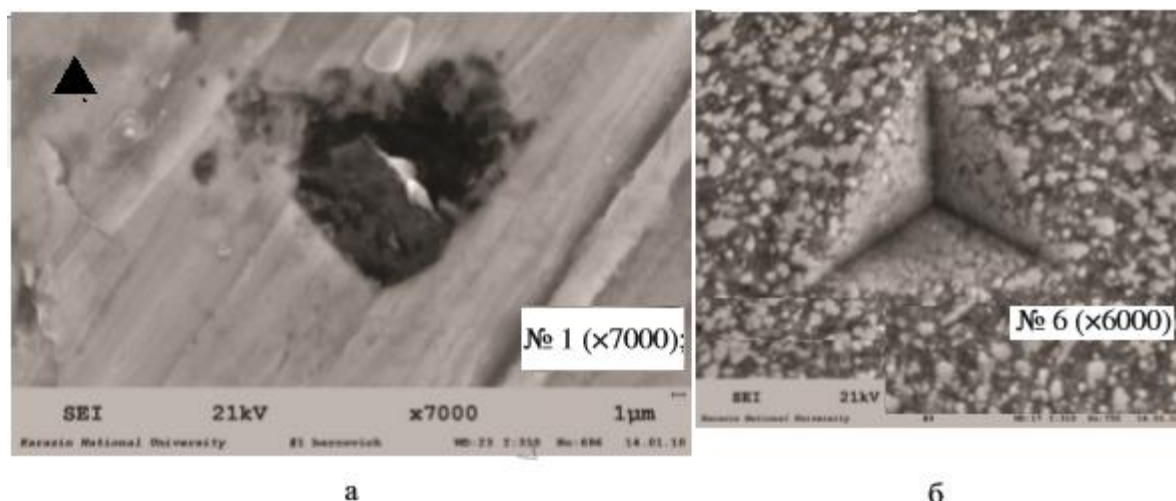


В)

**Рис.3.** Характерные особенности фактического формирования поверхности активированного объема материала при движении индентора в тело образца а) с малым модулем упругости в) обычные конструкционные материалы.

На Рис.4 фотографии характерного «нестандартного» результата наноиндентирования, из монографии [1]. При таком эксперименте наблюдалось образование «неправильного» отпечатка индентора пирамида Берковича. На Рис.4а показан фактический активированный объем (физический результат), провал неправильной формы при нано индентировании. Свободная поверхность провала значительно превышает по размеру предполагаемый отпечаток инструмента. Черный треугольник на Рис. 4а соответствует размеру предполагаемого правильного геометрического отпечатка пирамиды, при достигнутой глубине перемещения инструмента в этом эксперименте. Это необходимая глубина, в соответствии с требованиями стандарта наноиндентирования. В этом случае мы видим на снимке физическую поверхность  $S_p$ , образованную в результате спонтанного процесса разрушения. Откол и провал фрагмента материала свидетельствует о большой локальной плотности и высоком градиенте энергии деформирования. Процесс произошел по причине недостаточного уровня энергии шарового тензора напряжений (условий пластичности) в активированном объеме. Экспериментально установлено Бриджменом, что в условиях достаточного уровня всестороннего сжатия материал не разрушаем, но пластичен. Объем фрагмента  $V_p$ , больше геометрического объема  $V_a$ , который потенциально мог сформировать индентор Берковича. Поверхность отколовшегося фрагмента (площадь неправильного отпечатка в материале) существенно больше ожидаемой геометрической площади  $S_a$ . В данном случае фрагмент отколовшегося материала можно рассматривать как «сверх индентор», который сформировал собственную контактную физическую поверхность высокой твердости и прочности, её форма отличается от пирамиды, размер больше чем расчетные геометрические параметры отпечатка пирамиды Берковича.

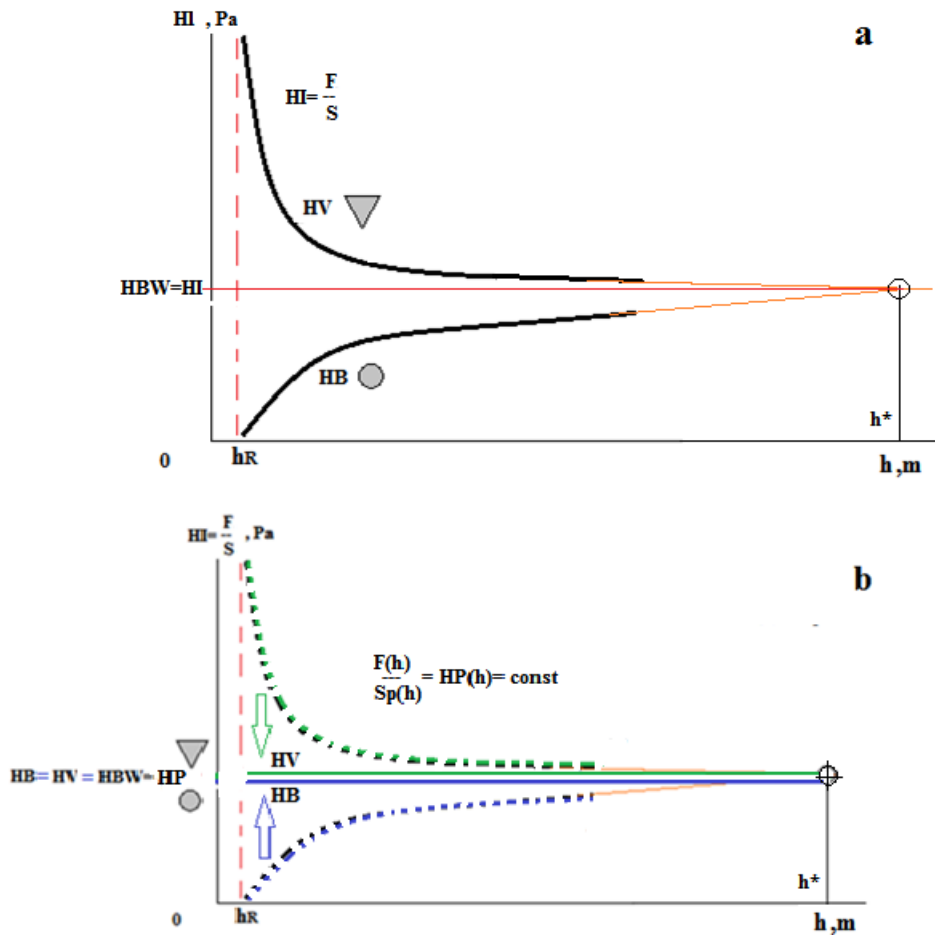
Изложенные факты можно объединить: при кинетическом индентировании происходят процессы различной мощности, градиента, вектора (потока) преобразований СЭС материала. стабилизации. Однозначной связи между суммарной накопленной силой или физической работой формоизменения материала и геометрией погруженной части индентора нет.



**Рис.4** Образование физического активированного объема и поверхности (провал) при наноиндентировании пирамидой Берковича. а). Спонтанное образование физической контактной поверхности. Характерный вид неконтролируемой формы отпечатка. б) правильна форма отпечатка. Размеры отпечатков показаны в близком масштабе. Из монографии [1] стр. 186.

Из этих данных следует. Вытесненный индентором материал формирует объем с собственными физическими границами поверхности, которые разделяют структурно-энергетические и физические процессы разрушения различной мощности, направления потока работы (напряжений) и др. Индентирование формирует в материале физический активированный объем, в котором происходят основные необратимые процессы изменения свойств испытуемого материала. Предполагаю, что волновые процессы движения энергии от необратимого разрушения структурных связей или особенностей микроскопического строения тела, в режиме нано и микро процессов индентирования, формируют особую микро физическую область  $V_p$ , с высокой плотностью энергии. Формирования области высокой плотности энергии деформированного материала проявляется в максимальной степени при нано индентировании. Физический объем  $V_p$  в общем случае может отличаться от геометрического условного объема индентирования  $V_a$ . При определении физического объема индентирования, следует учитывать образование присоединенного активированного объема  $V_x$ , присоединенной активированной площади контакта  $S_x$ . Предполагаю, что существует вариант или этап индентирования, в котором исключено или мало влияние неравномерности и неоднородности разрушительных процессов при формоизменении. Рассмотрим теоретически такую возможность.

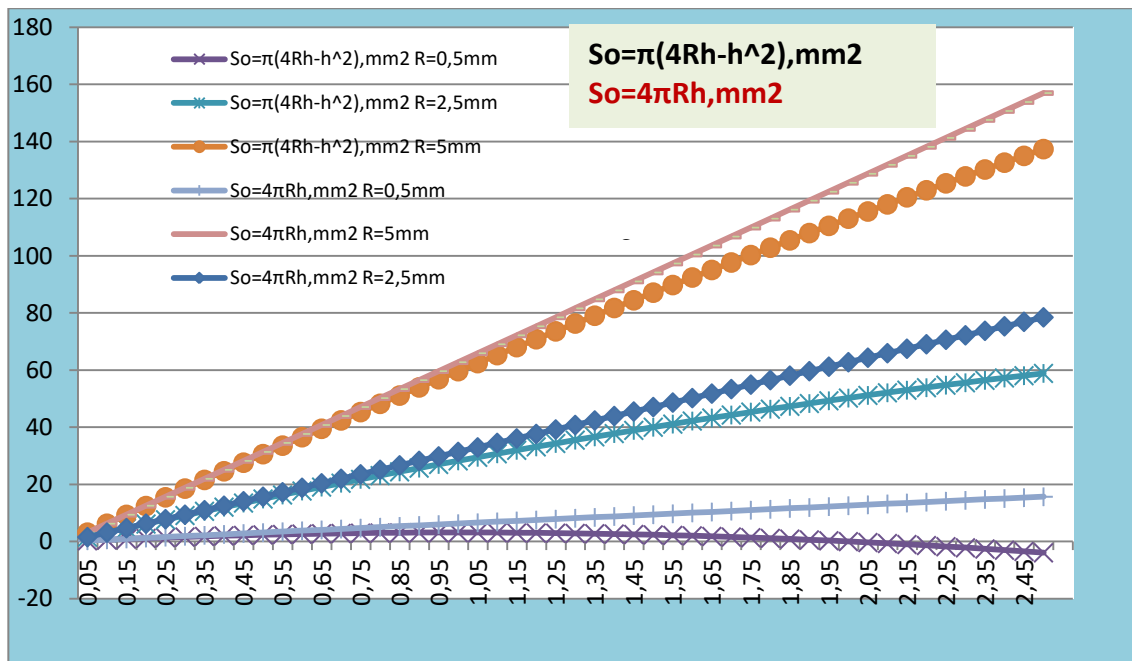
На Рис. 5 показаны характерные кинетические диаграммы твердости  $HI(h)$  для сферы и пирамиды Виккерса. Характер кривых твердости указывает на существенное различие в образовании активированного объема у разных по форме инструментов.



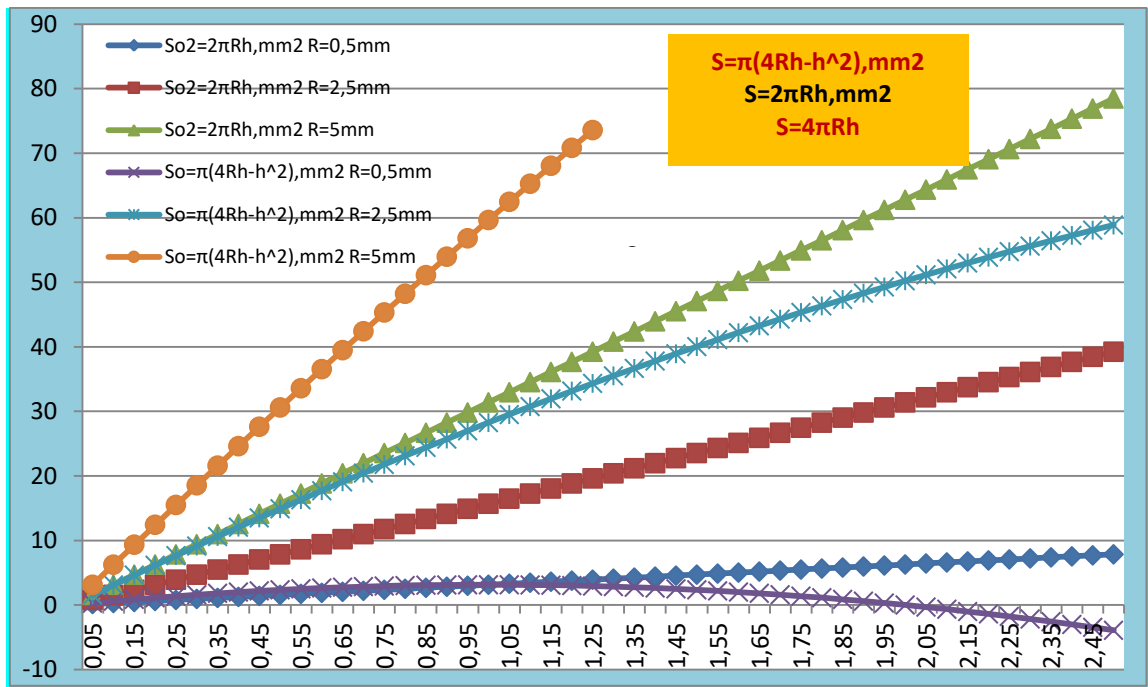
**Рис.5** Преобразование формы графика эмпирической функции  $NI(h)$  кинетического поверхностного индентирования в функцию физического процесса  $HP(h)$ : а) экспериментальные эмпирические кинетические диаграммы поверхностной твердости стали  $NI(h)$  и экстраполяция диаграмм; б). преобразование экспериментальной диаграммы в физическую  $HP(h)$  по формуле (4). Нижняя кривая сфера D2,5mm, верхняя кривая пирамида Виккерса. На основании экспериментальных диаграмм для стали 45 [5,7].

Детальный анализ свойств формул принятых авторами для расчета условной площади геометрической поверхности  $So(h)$  [1,7,19] показал следующее. Правильная наиболее точная формула для определения условной геометрической поверхности контакта (пересечения) сферой индентора с телом и геометрической плоскостью поверхности испытуемого материала [21]:

$$S_o(h) = \pi(4Rh - h^2). \quad (4.1)$$



a)



b)

**Рис. 6.** Функции площади геометрической условной контактной поверхности  $S_o(h)$ , посчитаны по разным формулам: а)  $S_o(h) = 4\pi Rh, S_o(h) = \pi(4Rh - h^2)$  [21]; б)  $S_o = 2\pi Rh$ . [1]

Распространенная в расчетах эмпирической твердости формула  $S_o = 2\pi Rh$ , и другие подобные формулы с учетом некоторых корректировок на прогиб и др., так же дают значительные ошибки с ростом глубины  $h$ . На Рис. 15 показан характер расчетных кривых  $S_o(h)$  полученных разными формулами. Из анализа следует, что наиболее точной, хотя она остается приближенной, для расчета площади сферической поверхности условного контакта можно считать формулу:

$$S_o = 4\pi Rh. \quad (4.2)$$

Использование данной более точной формулы позволило увидеть процесс смены механизмов образования контактной поверхности для сфер разного диаметра и найти участки подобия, возникающие при индентировании разным инструментом. Удалось сравнить диаграммы корректных значений удельных показателей  $X_{sv} = S/V$  для сферы и пирамиды  $X_{sv,1}/m$  - удельная площадь контактной поверхности индентирования.

Авторы методов индентирования определяют площадь контакта сферического индентора и восстановленную площадь разными формулами, применим для анализа универсальную формулу:

$$S_o = \delta \pi R h, \quad (4.3)$$

Где,  $\delta$  – аналитический коэффициент, соответствующий принятой методике для приближенного расчета площади сферической контактной поверхности.

Для анализа свойств макро режимов можно принять в первом приближении  $\delta = 2 \div 4$ , поскольку в расчетах авторы исследований применяют значения в указанном интервале. Для исследования характера поведения *физических свойств функций* индентирования, сопоставления, во многих случаях не имеет значения точность данного коэффициента. В последующих расчетах мы применяем (4.2) или особо указываем, какая формула (коэффициент  $\delta$ ) была использована в расчетах площади образовавшейся сферической поверхности индентирования.

Для анализа степени влияния величины активированного влияния, описания свойств гипотетической модели физической модели процесса используем понятие физический активированный объем.

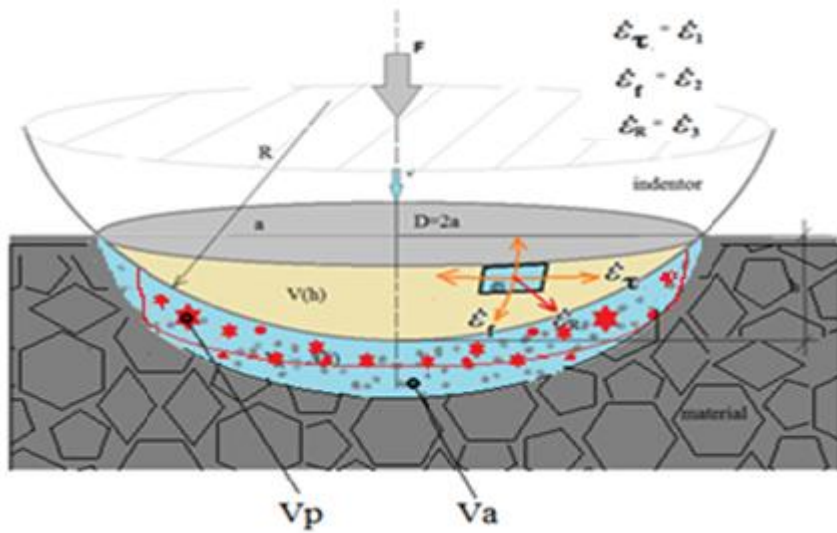
Предположим, что мы определили функцию физического активированного объема  $V_p(h)$  и соответствующую площадь физической поверхности  $S_p(h)$ . Подставим в формулы (4) величину физической поверхности индентирования  $S_p(h)$ , определим физическую кинетическую твердость. Из физической теории следует зависимость:

$$HIP(h) = F(h)/S_p(h) = HP = \text{const} \quad (4.4).$$

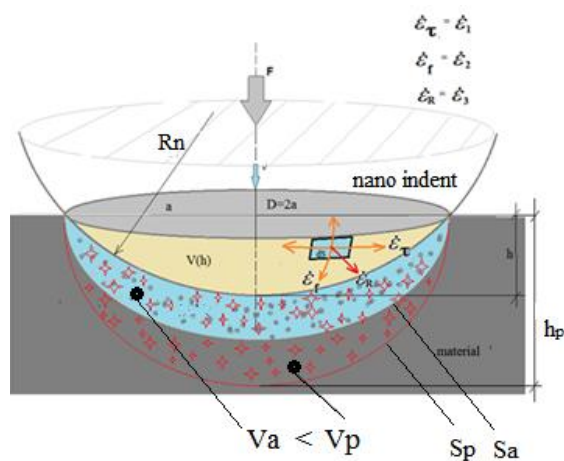
На Рис. 5b показан предполагаемый характер поведения гипотетической функции  $HIP(h)$  при подстановке в формулу (4) физической площади контакта активированного объема  $S_p(h)$  и не активированного, для сферы  $D2,5\text{mm}$  и пирамиды Виккерса. В любой точке физической диаграммы  $HIP(h)$  получаем постоянное значение физической твердости  $HP = HBW$ . Таким образом, первоначальная нелинейная эмпирическая экспериментальная диаграмма индентирования может быть преобразована в линейную зависимость, при помощи физических функций поверхности активированного объема сферы  $S_po(h)$ , пирамиды  $S_pv(h)$ . Используя аналитические методы анализа диаграммы нагрузки  $F(h)$  кинетического индентирования. Убедимся, что для оценки физической твердости достаточно определить свойства приращения (относительные характеристики) величин физического активированного объема и площади. Знать абсолютное значение

величин не обязательно, подобно энтропии, физической характеристике термодинамической статистической системы.

На Рис.6 показана гипотетическая форма физического активированного объема  $V_p$  и форма профиля поверхности  $SP_0$  для макро (a) и нано (b) сферического индентора, для глубины  $h \approx 0,2R$ . Физический объем предполагает развитой шаровый тензор ДТТ – большое контактное давление одинаковое по трем осям тензора. Из формулы (4), для Ст45, можем получить теоретическую функцию физической поверхности  $SP_0(h)$ . Используя данные полученные в части А, Ст45,  $HBW=HP=2GPa$ , формулу (4), вычислим и построим функцию физической поверхности  $SP_0(h)$ , Рис. 7с.

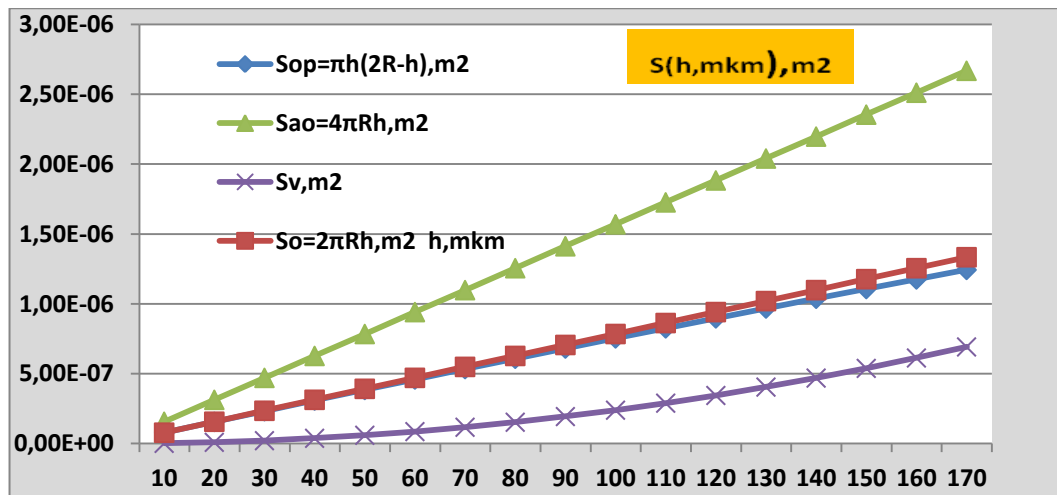


a)



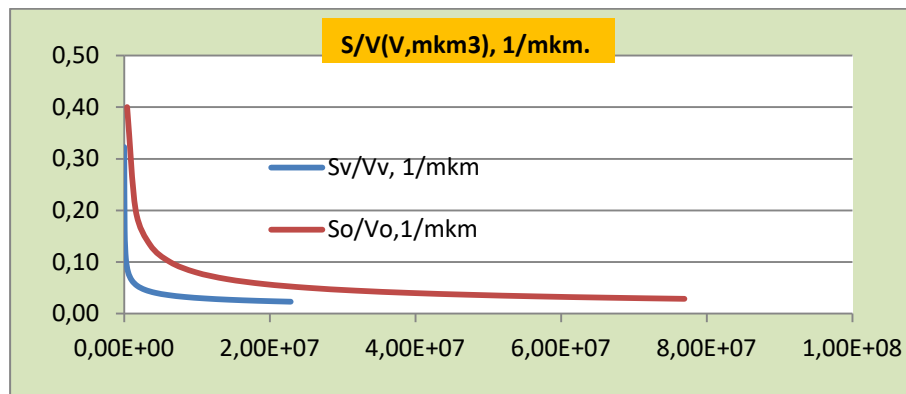
b)



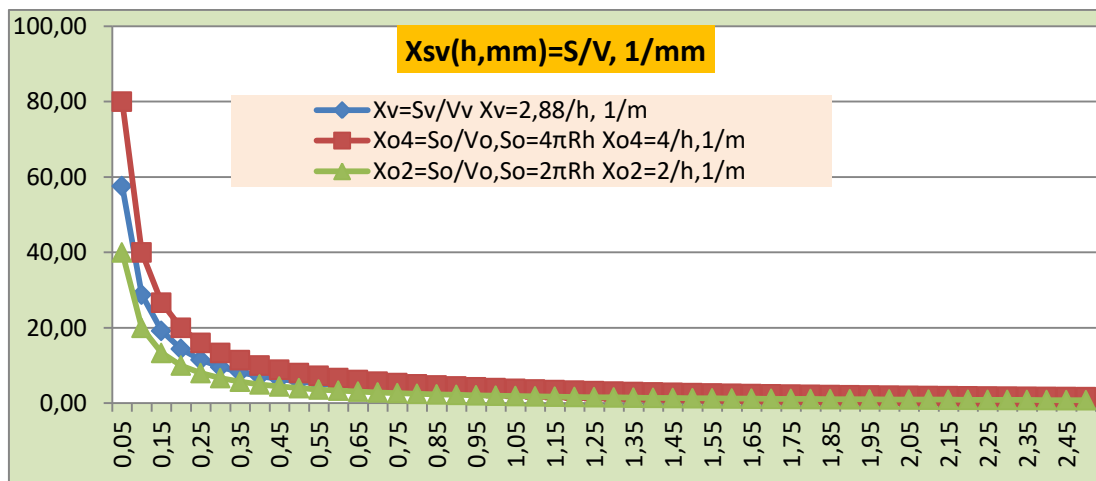


c)

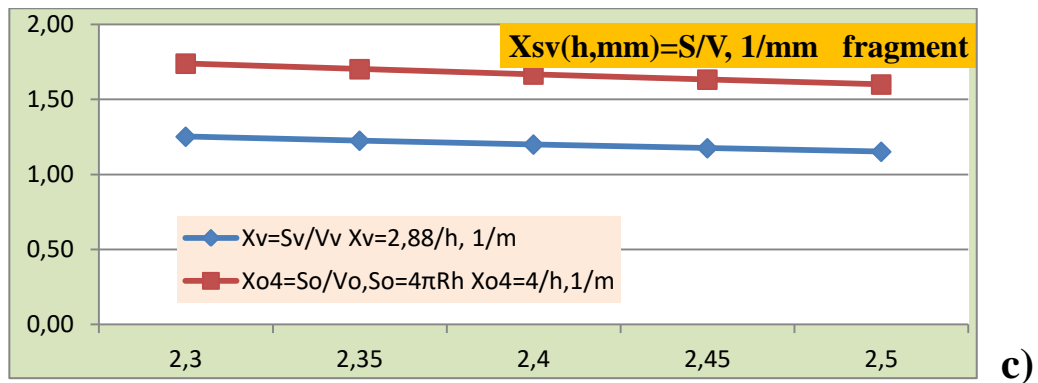
**Рис.7.** Схематическое представление формы условного  $V_a$  и физического  $V_p$  активированного объема. Модель профиля контактной поверхности геометрического  $S_a$  и физического  $S_p$  активированного объема индентирования: а) – поверхностное макро индентирование, неоднородная структура, б) нано индентирование, подготовленная поверхность и верхний слой материала. Пропорции размеров сферы макро и нано индентора условные; с) функции поверхности контакта: условная сфера -  $So(h)$ , уточнения формула для сферы  $Sao(h)$ , условная пирамида –  $Sv(h)$ , проекционная площадь сферы -  $Sop(h)=$ .



a)

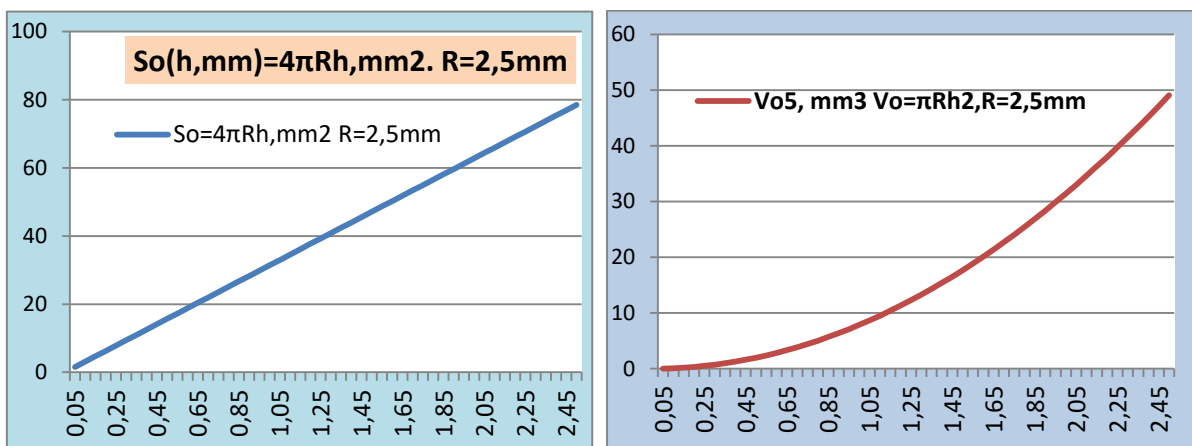


b)



**Рис. 8.** Удельная условная геометрическая поверхность контакта индентирования  $X_{sv}(h) = S(h) / V(h)$ . Сфера D2,5mm и пирамид Виккерса.: а) Функция  $X_{sv}(V, \text{mkm}^3)$ , 1/mkm. б,с)  $X_{sv}(h, \text{mkm})$ ,  $X_{sv}(h, \text{mkm})$ , 1/mkm.  $S_o = 4\pi Rh$ ,  $S_v = 23,96 \cdot h^2$  Нижний индекс указывает форму индентора, о- сфера, v – пирамида.

В начальной точке контакта физическая поверхность  $S_{Po}$  почти в 25 раз меньше геометрической условной площади  $S_o$  контакта. Следовательно, давление НР, согласно формулы (4), будет выше во столько же раз. Рис.7 отображает схематически эквивалентную физическую поверхность. В обычном расчете твердости  $HI(h)$  мы использовали формулу (1.1), см. часть А, подставляя при этом условную площадь большего размера  $S_a$  и больший объем  $V_{a0}$ .



**Рис.8.1** Сопоставление функций поверхности контакта  $S_o(h)$  и вытесненного объема  $V_o(h)$  для сферы D2.5mm

Учитывая особенности определения площади поверхности, в случаях восстановленной (по отпечатку) и не восстановленной твердости (кинетическая характеристика), применим в физическом кинетическом индентировании дополнительные характеристики процесса.

**Формоизменение материала** – изменение, образование новой площади поверхности активированного (вытесненного) объема материала  $S_a$  в результате кинетического индентирования. В общем случае это может быть и поверхность навала и др.

Иногда применим равнозначный термин **ПЛОЩАДЬ ПОВЕРХНОСТИ**

**ИНДЕНТИРОВАНИЯ.** Контактная (совместная) поверхность материала и индентора обозначена -  $S$ . Нижний индекс  $o$  (сфера) или  $v$  (пирамида, конус) условно обозначает форму индентора. Восстановленная контактная (бывшая в контакте) поверхность материала -  $S_R$ , определяется после снятия нагрузки на индентор (площадь отпечатка). Эта характеристика нас интересует в меньшей степени. В общем случае имеем две главные разные характеристики процесса  $S \neq S_a$ . Для физического процесса важна величина любой новой, образованной при индентировании площади поверхности активированного (вытесненного) объема материала  $S_a$ . На Рис.3 можно видеть различие этих характеристик на схематическом сечении. Очевидно, в общем случае:

$$S_a \geq S > S_R.$$

Для расчетов сравнительных физических характеристик мы применим приближенные методы. В частности не восстановленная кинетическая поверхность определяется одной формулой, а восстановленная площадь контакта будет определяться другой формулой [1]. Понятие внешняя площадь поверхности активированного объема (вытесненного) материала  $S_a(h)$ , полнее характеризует физические процессы кинетического индентирования. Нано и микро индентирование характеризует дополнительно внутренняя физическая поверхность  $S_p$  индентированного материала.

**Формообразование материала** – перемещение активированной индентором массы, объема тела, трансляция структурного состояния вещества, материала (атомов, кластеров, ионов и др. элементарных структурных единиц среды). Кинетический процесс, происходящий в геометрическом пространстве исследуемого образца или заготовки, сопровождается изменением внешних  $S_a$  или внутренних физических границ  $S_p$  (вне прямого контакта с инструментом) активированного объема при индентировании.

Для расчетов физических характеристик мы применим приближенные методы. В частности восстановленная площадь контакта будет определяться формулой:

$$S_o = 2\pi Rh, \quad \delta = 2 \quad (4.5)$$

Кинетическая характеристика площади активированного объема площади поверхности активированного (вытесненного) объема материала  $S_a(h)$  более точно определяется формулой:

$$S_o = 4\pi Rh, \quad \delta = 4 \quad (4.6)$$

О физических причинах повышенного значения поверхностной твердости на начальном этапе у пирамиды, в сравнении с поверхностной твердостью индентора сфера. У пирамиды, в начале процесса индентирования малая удельная плотность поверхности  $X_{sv}(h) = S(h)/V(h)$ , Рис. 8. Параметр  $X_v$  пирамиды, на любой глубине  $h$ , в 3-4 раза меньше чем  $X_o$  сферы, соответственно и твердость  $HV$  в 3-4 раза выше  $HV$  (обратная зависимость). Чем больше объем активированный разрушительным процессом

приходится на единицу поверхности контакта (чем меньше параметр  $X_{sv}$ ), тем меньше показатель механической твердости, меньше удельной энергии необходимо на создание новой поверхности контакта. Физический процесс индентирования заключается в преобразовании объемной энергии волн квазичастиц разрушения в энергию волн-квазичастиц новой свободной контактной поверхности. Таким образом, контактная поверхность инструмента выступает катализатором при генерации новой физической поверхности контакта тела и индентора. Чем больше удельной контактной поверхности у данного инструмента (на единицу объема активации), тем меньше показатель механической эмпирической твердости. Это наглядно видим из сравнения параметров  $X_0$  и  $X_v$ , на Рис. 8. Из графиков функций  $X_{sv}=S/V$ , Рис. 8, следует, что у пирамиды всегда меньше удельная геометрическая поверхность, чем у сферы, при равной глубине индентирования  $h$  мкм. Волновой поток энергии на контактной поверхности пирамиды (условное давление) больше чем для сферы (соответственно и параметр  $F/S$  больше). Отметим, что параметр удельной поверхности сферы  $X_0$ , больше, при равных объемах активации  $V$ , чем этот показатель пирамиды  $X_v$ , Рис 8а. Это означает следующее. При равной глубине  $h$ , один материал, например ст45, имеет показатель поверхностной твердости больше у того индентора, который генерирует меньшую площадь  $S$  на единицу активированного объема (см. далее) за одинаковый шаг  $\Delta h$ , при равной плотности энергии  $PVA$ . Такой результат полностью согласуется с выводами физической теории: удельная работа формоизменения ДТТ, которая расходуется на создание новой поверхности пирамидой, должна быть больше, чем работа произведенная сферой. Далее, рассматривая свойства функции удельной плотности энергии индентирования  $PVA(h)$ ,  $J/m^3$  мы подтвердим это предположение.

Расчет для различных форм инденторов удельной площади контакта  $X_{sv}$  показал, что этот параметр вблизи  $h=0,3mm$ , Рис.8, равен  $X_v \approx X_0 = 1E+4,1/m$ . Одновременно на этой глубине равны между собой параметры  $PVA$  и  $HIV$  для HB103, сферы  $D2,5mm$ , пирамида Виккерса. Подобный результат получен для меры HB411, но для меньшего значения  $h=0,23mm$ . Обобщая эти результаты, можем предположить. При достаточно *малом активированном объеме* любой формы индентора, а так же с ростом твердости материала, физические активационные энергетические процессы формоизменения материала для малых объемов любых инденторов стремятся к подобию. Отметим, мы рассмотрели начальный этап макро режима индентирования. Нано и микро индентирование, требуют отдельного рассмотрения физических свойств. Плотность энергии индентирования для нано и микро активированных объемов в несколько раз выше, чем для больших значений  $Va(h)$ .

Далее, при описании формоизменения тела при индентировании мы используем физико-механические модели и три основные характеристики процессов. Объем перемещенного материала  $Va$  (активированный объем). Площадь условной поверхности материала  $Sa$  образующуюся при вынужденном механическом (или ином принципе) перемещения границы контакта абсолютно твердого тела индентора и исследуемого материала. Работа -  $A, J$ , выполненная индентором при перемещении на некоторую глубину  $h$ . Используем производные основных характеристик, частное от деления  $A/Va$ ,  $J/m^3$  - плотность энергии индентирования (удельная работа). Дополнительные параметры

для анализа процесса индентирования: перемещение индентора, скорость движения индентора, температура  $V_a$ , а так же производные характерных величин и параметров. Учитывая основные характеристики процесса, использованные в моделях, рассматриваем два подхода.

**Механический подход (эмпирический).** Активированный (вытесненный, замещенный) индентором условный геометрический объем  $V_a$ . Условная геометрическая поверхность контакта индентора и материала  $S$ .

**Физический подход.** Активированный индентором физический объем материала  $V_p$ , в котором происходят необратимые и обратимые термодинамические и физико-механические микро процессы структурных изменений свойств материала в результате ротации и трансляции микроскопических потоков энергии волн-квазичастиц де Бройля. В общем случае  $V_a \neq V_p$ . Рассматриваем объем с анизотропными показателями плотности энергии разрушительных процессов. Поверхность  $S_{ap}$  рассматривается как контактная. Для простоты индекс  $p$  далее не пишем. Одновременно при индентировании возникает физическая граница  $S_p$  раздела активированного индентором объема и невозмущенного разрушительным необратимым процессом объема ДТТ. Физическая поверхность  $S_p$  подразумевает границы существенно различных структурно-энергетических параметров состояния материала, возникающих в результате индентирования. Эта граница разделяет разные энергетические состояния материала, представляет преграду для процессов движения квантов волн разрушительных процессов. Очевидно, что эта граница не имеет ярко выраженного характера, подобная ситуация имеет место при разделении пластических и упругих деформаций.

При решении инженерной задачи определения твердости материала мы будем применять объединенную модель, рассмотрим энергию двух этих процессов в объеме тела, используя физический корпускулярно-волновой подход.

### **3. Функция плотности энергии активированного объема индентирования, свойства. Физическая твердость материала.**

#### **3.1. Анализ аналитических свойств и параметров функции плотности энергии индентирования. Интегральная и дифференциальная форма функции.**

Для определения физической меры твердости материала используем подход структурно-энергетической физической теории прочности твердых тел [12,14] и аналитический и физический принцип анализа кинетических функций индентирования, подобный методу, предложенному в работе посвященной определению механических свойств материалов по их экспериментальным кинетическим свойствам твердости [9].

Из физической теории следует, объективной характеристикой физических процессов индентирования является функция состояния термомеханической системы инструмент-тело образец-механизм. Такой функцией может быть удельная энергия разрушительных необратимых процессов в физическом активированном объеме индентирования или функция плотности энергии активированного объема

кинетического индентирования  $PVA(h)$ ,  $J/m^3$ , (6). Для исследования свойств функции состояния индентирования как главной характеристики процесса нам необходимо обосновать модель искомой физической термомеханической системы. Определим, какими параметрами мы можем описать искомую систему, выделить её из физико-механического процесса взаимодействия исходной системы «машина индентор материал». Рассмотрим свойства функции удельной энергии  $PVA(h)$  на примерах процесса индентирования разным инструментом и для разных режимов (макро, нано).

Работа индентирования определена стандартом ISO 14577 [3]. На Рис. 7 показан характерный вид функций работы  $A(h)$  для Ст45, сфера D2.5mm и пирамида Викаерса.

$$A_0(h) = \int_0^{h(t)} F(h) dh \cdot J. \quad (5)$$

Где,  $A_0(h)$ ,  $J$  работа индентирования. В стандарте ISO 14577 другое обозначение работы -  $W(h), J$ . На данном этапе мы не разделяем упругую составляющую и пластическую (необратимую) работы индентирования. Отметим, что с ростом глубины кинетического индентирования, исходя из экспериментальных данных [1], доля упругой составляющей удельной энергии материала становится незначительной.

Предположим, что весь условный геометрический активированный объем  $V_0(h)$  можно представить как однородную термодинамическую систему, в которой равномерно по объему происходит физический процесс разрушения структурно-энергетических свойств материала. Предположим, работа произведенная индентором (5) в этом процессе равномерно распределена в объеме  $V_0(h)$ . В этом случае получим функцию плотности энергии активированного объема кинетического индентирования:

$$PVA.(h) = \frac{A(h)}{V(h)}, \quad J/m^3. \quad (6)$$

Определим зависимость плотности энергии  $PVA(h)$ , используя (5) и (6):

$$PVA.(h) = \frac{A(h)}{V(h)} = \frac{\int_0^{h(t)} F(h) dh}{V(h)}, \quad J/m^3. \quad (7)$$

Функция нагрузки на индентор может быть аппроксимирована полином вида [1]:

$$F(h) = a \cdot h^n + b \cdot h, \quad N \quad (7.1)$$

Где,  $a, b, n$  – константы, полученные по результатам аппроксимации (тренды) экспериментальной функции  $F(h)$ . Используя (5), (7.1):

$$A(h) = \int_0^{h(t)} (a \cdot h^n + b \cdot h) dh = \frac{1}{n+1} a \cdot h^{n+1} + \frac{1}{2} b \cdot h^2, \quad J \quad (7.2)$$

Для случая полином второго порядка  $n=2$ ,  $F(h) = a \cdot h^2 + b \cdot h$  из (7.2) получим:

$$A(h) = \frac{1}{3} a \cdot h^3 + \frac{1}{2} b \cdot h^2 = \frac{2ah^3 + 3bh^2}{6}, n=2, J \quad (7.3).$$

Окончательно для сферы.  $V_o(h) = \pi R h$ ,

$$PVA_o(h, R) = \frac{A_o(h)}{V_o(h)} = \frac{2_o h^3 + 3b_o h^2}{6\pi R h^2}, J/m^3 \quad R = D/2, m \quad (7.4)$$

Для удобства анализа выполним простые преобразования, получим для сферы:

$$PVA_o(h, R) = \frac{1}{R} \cdot \left( \frac{a_o}{3\pi} h + \frac{b_o}{2\pi} \right) \quad (7.5)$$

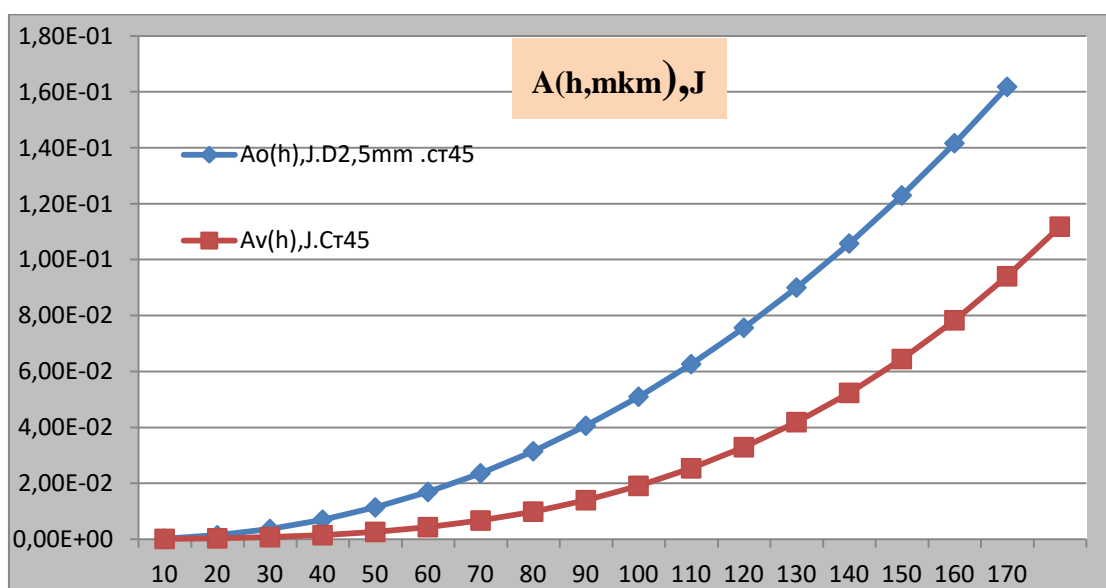
$$PVA_o(h, R) = A_o \cdot h + B_o, \text{ где } A_o = \frac{a_o}{3\pi R}, B_o = \frac{b_o}{2\pi R} \quad (7.6)$$

Получим зависимости для вытесненного объема пирамидой Виккерса:

$V_v = \beta h^3$ , где  $\beta$  - параметр формы конуса или пирамиды:

$$PVA_v(h, R) = A_v \frac{1}{h} + B_v, A_v = \frac{3b_o}{\beta}, B_v = \frac{2a_v}{\beta}, (7.7)$$

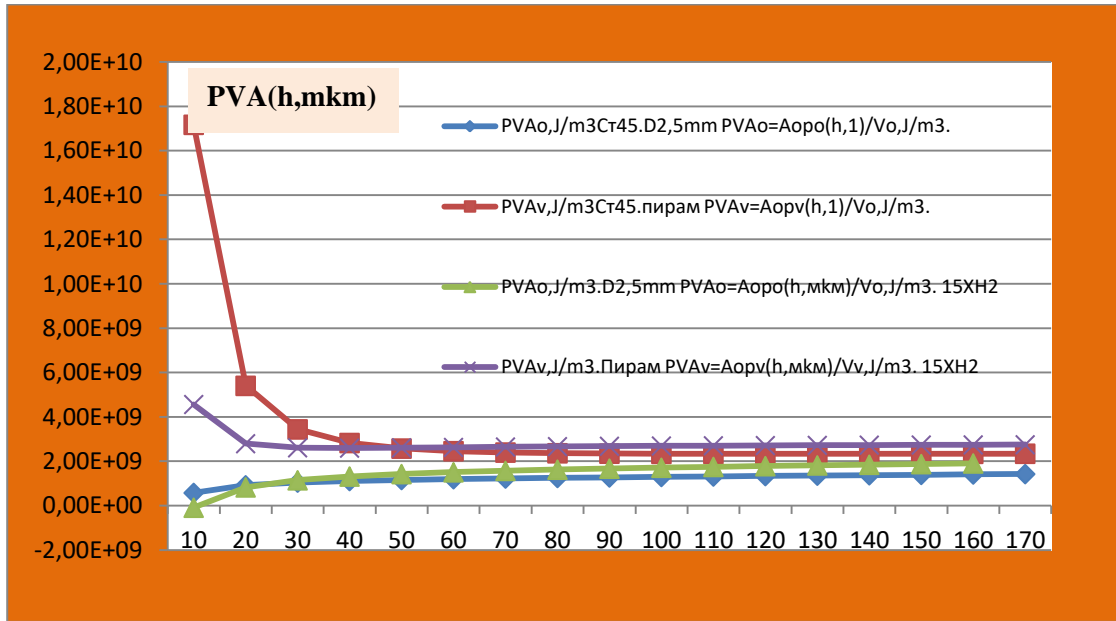
Формулы (7.5 -7.6) позволяют оценить влияние на плотность энергии параметров характеризующих форму индентора (форму поверхности контакта)  $R, \beta$ , для сферы и пирамиды соответственно. Аналогично можно исследовать влияние параметров функции усилия  $a, b$ , индентора, на поведение функции энергии  $PVA(h)$ .



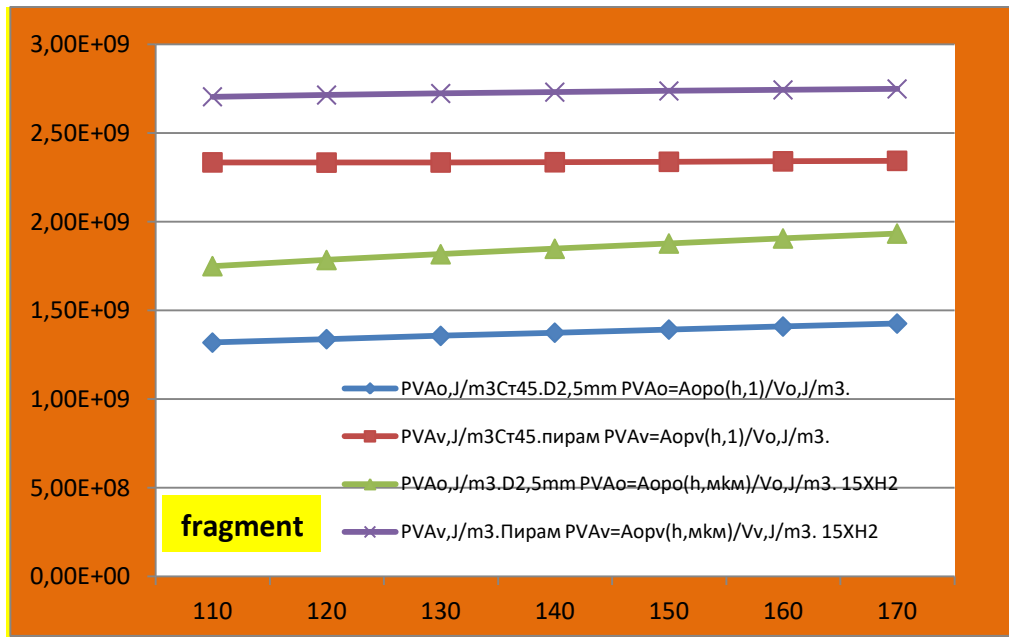
**Рис.7.1** Работа кинетического индентирования  $A(h, \text{мкм}), J$ , Ст.45: Аорo- сфера 2.5мм; Аорv - Пирамида Виккерса. По данным [19].

Для построения функций  $PVA(h)$  используем экспериментальные зависимости  $F(h)$ , которые были рассмотрены в части А этой работы. На Рис.7.1 показаны характерные графики  $A(h, mkm), J$ , на примере Ст.45, сфера 2.5мм, пирамида Виккерса [19].

На Рис.8 диаграммы плотности энергии инденитирования  $PVA(h)$ ,  $J/m^3$ . Хорошо видно, что плотность энергии процесса зависит от твердости сталей. На фрагментах графиков стабильного линейного роста энергии материала у сферы и пирамиды видно приращение  $\Delta PVA(\Delta h)$ , Рис.8 b,c,d,e. На графиках Рис.8с видим, изменение коэффициентов первого члена уравнения тренда, влияет на наклон линии  $PVA(h)$  к оси  $h$ . Очевидна связь постоянной компоненты энергии и второго члена уравнения.

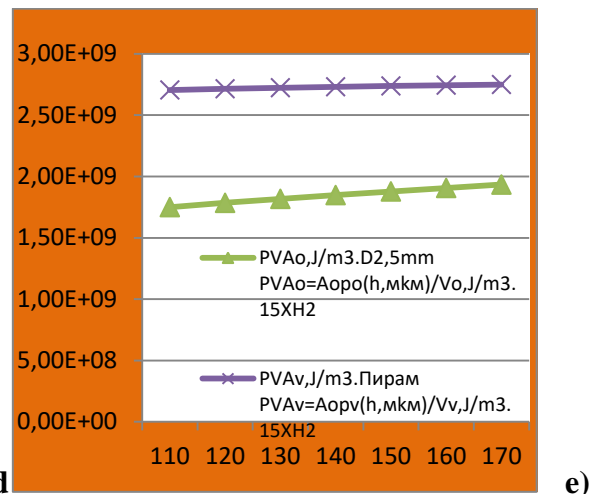
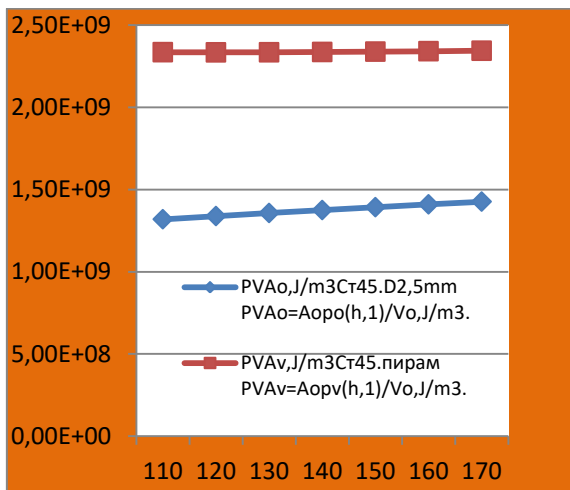
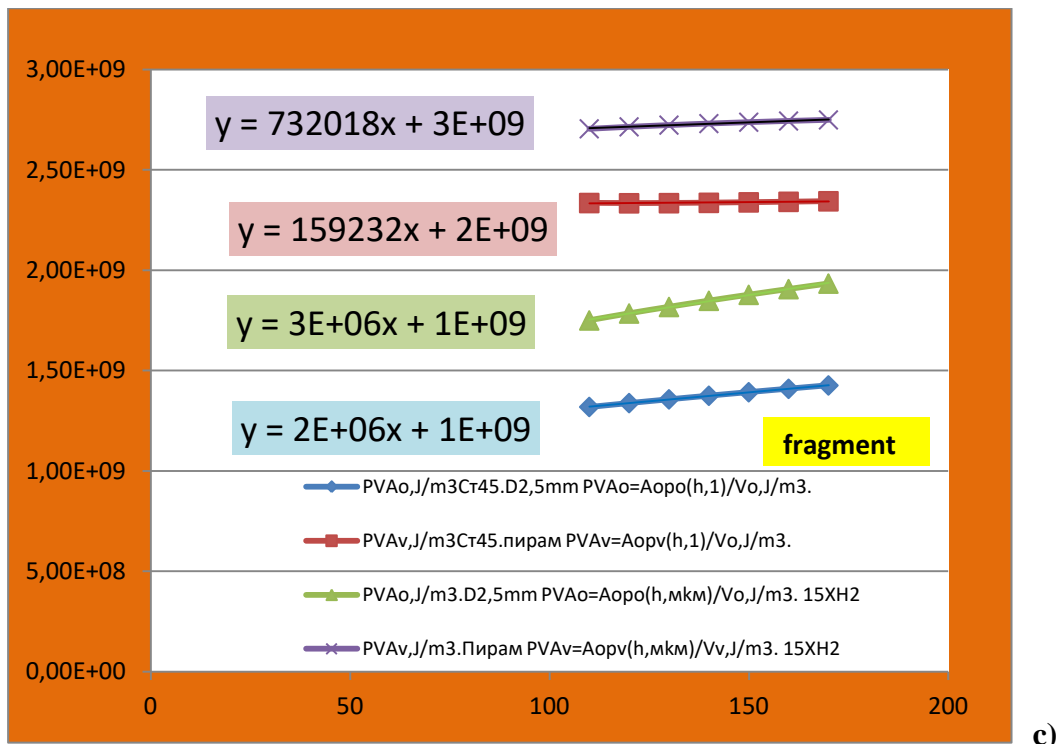


a)



b)



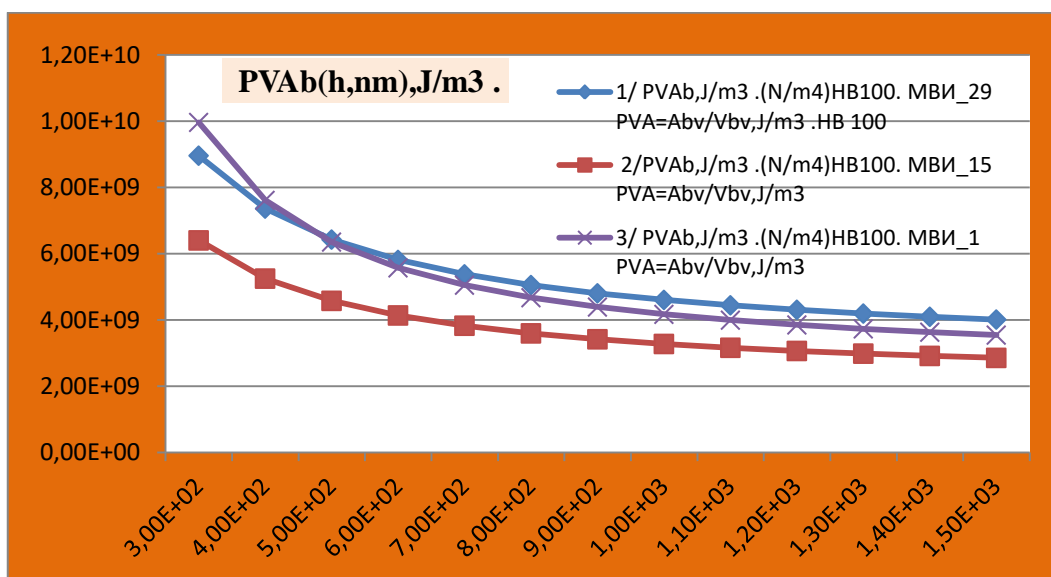


**Рис. 8.** Плотность энергии кинетической твердости PVA(h,mkm), J/m<sup>3</sup>, сталь 45 и 15XH2, сфера D2.,5mm и пирамида Виккерса: а) Полная диаграмма; б) Участок стабилизации процесса индентирования; с) Аппроксимация на участке стабилизации; d,e) Отдельно для каждой стали фрагменты стабилизации функции PVA(h,mkm), у сферы рост, у пирамиды const. Экспериментальные данные [19].

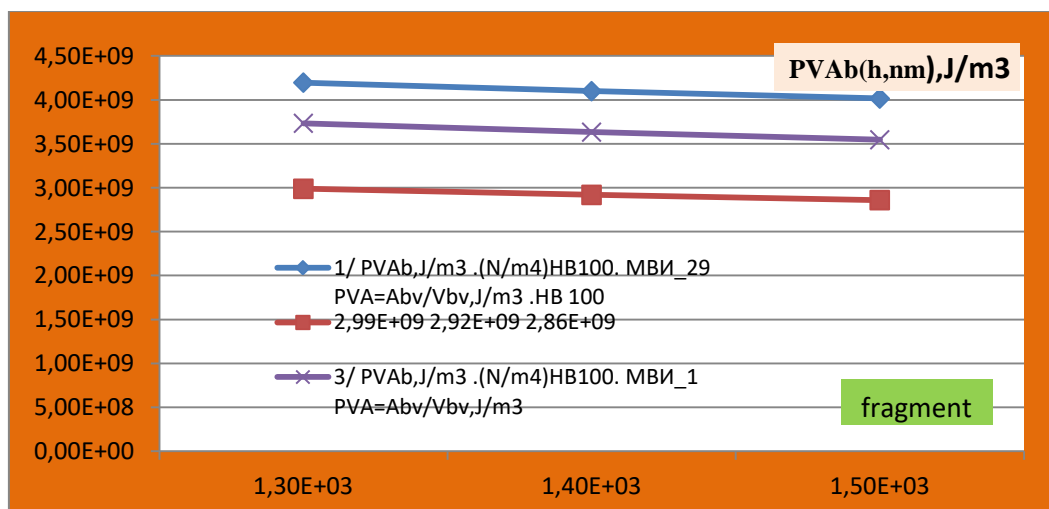
Показатель механической кинетической плотности энергии индентирования отражает различие в затратах энергии на процесс формоизменения (перетекание, ротация состояния структуры и частиц массы тела), структурные преобразования материала, разрушения взаимодействия структурных единиц (СЕ). Разные наклоны графиков PVA характеризуют влияние геометрии инденторов на обобщенную удельную мощность необратимых процессов (наклон - частная производная  $\partial PVA/\partial h$ ). При переходе от ст45 к 15XH2 так же меняется условная скорость (производная по параметру h) роста плотности энергии PVA(h) в процессе индентирования. Очевидна связь между показателями механической твердости и удельной работой индентирования. В данном случае был рассмотрен малый диапазон глубины индентирования, до  $h_{max} = 0,17mm$ . Но этого

достаточно, наблюдается асимптотическое сближение и выравнивание диаграмм с ростом  $h$ . Процессы показаны на одинаковых материалах, разные инденторы.

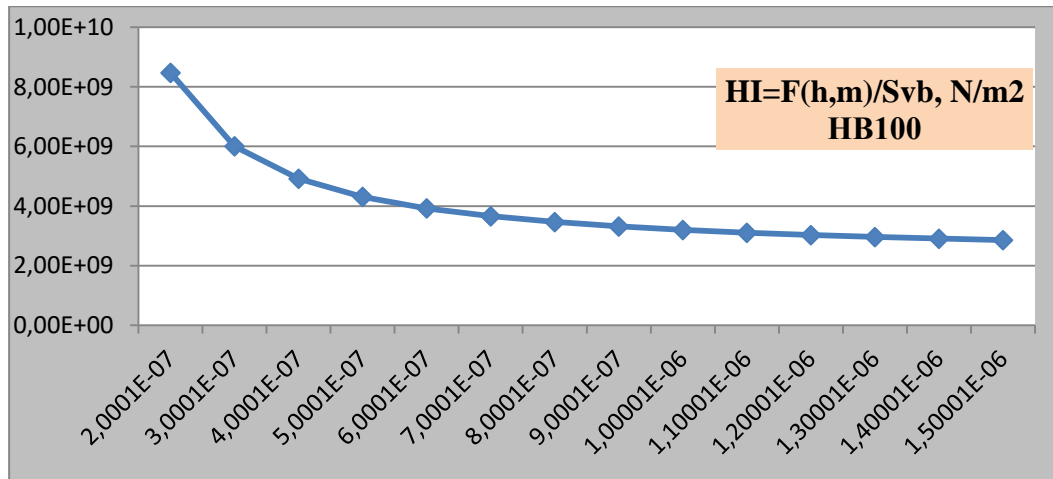
Рассмотрим результаты построения кинетических функций  $PVA(h)$ , объемной твердости  $НIVob(h, nm)$  и поверхностной твердости  $НI(h, m)$ , для пирамиды Берковича, режим нано индентирования. Рис. 9,10,11. Данные индентирования профессора В.И. Мощенок ХНАДУ. Из сопоставления кинетических функций плотности энергии  $PVAb(h)$  и твердости  $НI(h)$  следует. На участках стабилизации процесса (нано  $h > 1,3E+6, nm$ , макро  $h > 0,2mm$ ) для нано режима эти показатели приблизительно в 3 раза больше чем в режиме макро. Основная физическая причина такого различия твердости и показателя плотности энергии индентирования, для режимов макро и нано, предположительно, в различии удельного показателя площади контакта и активированного объема  $X_{sv} = S/V$ . Так же установлена устойчивая корреляция роста нано твердости от роста скорости условных относительных пластических деформаций контактной поверхности  $\dot{\epsilon}_r$ . В малом объеме начального контакта индентора и материала, при этом большие значения параметра  $X_{sv}$ , наблюдаем повышенную относительно макро режима твердость и большие скорости относительных пластических деформаций поверхности контакта. Расчет см. 1А.



b)

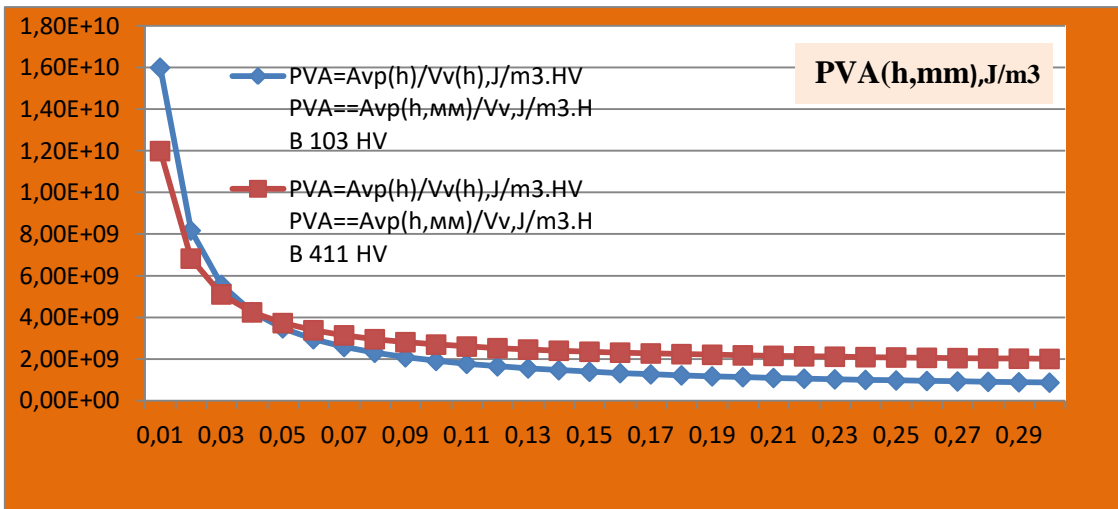


c)

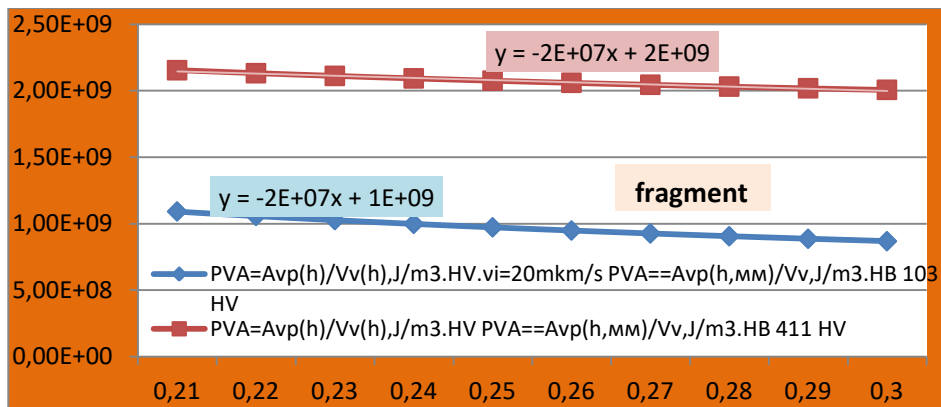


d)

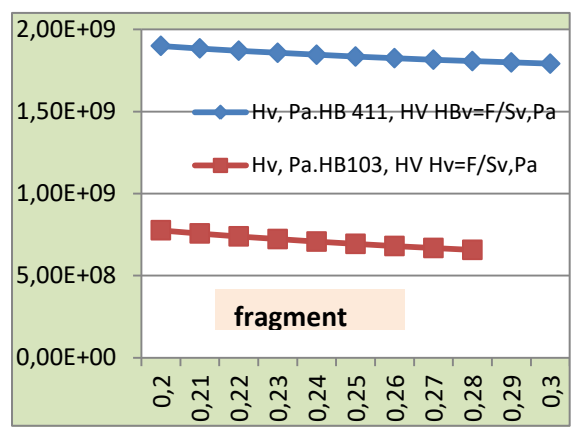
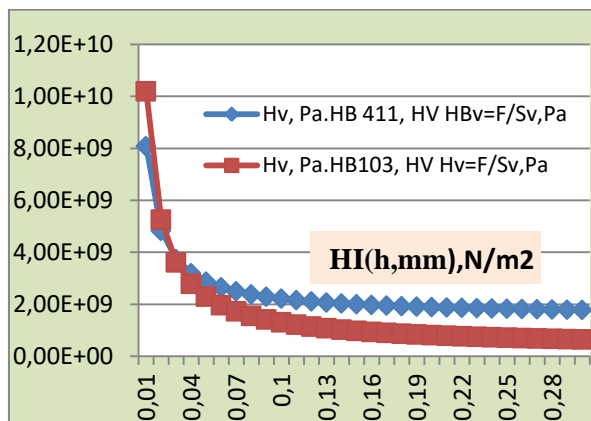
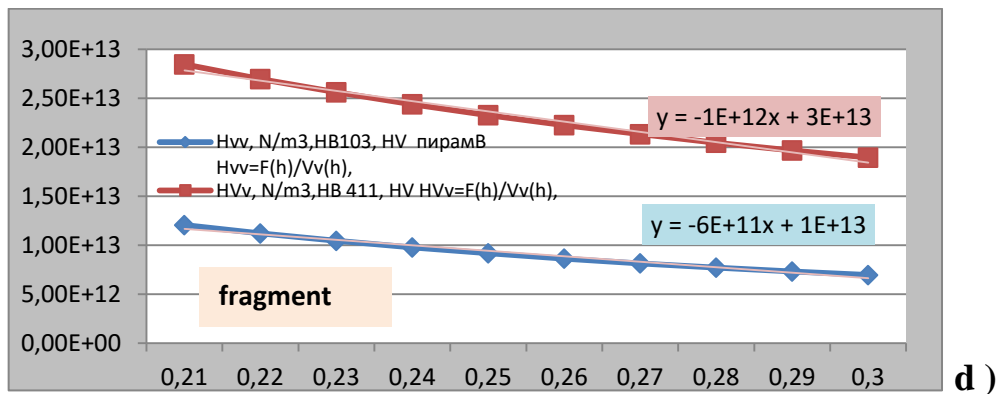
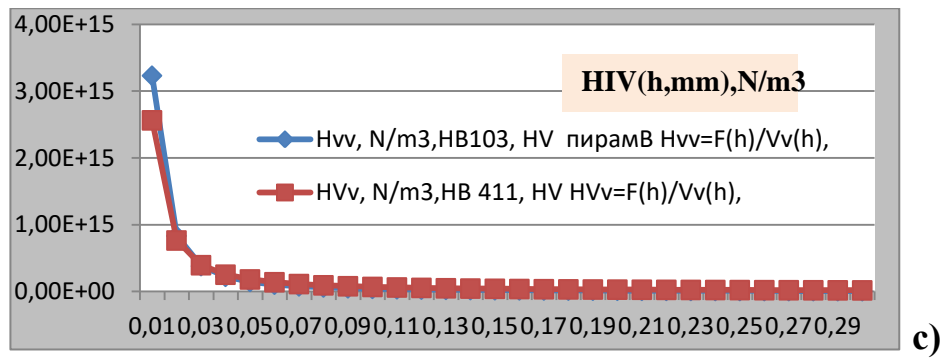
**Рис. 9a,b,c,d.** Кинетические диаграммы трех испытаний на одном образце меры твердости HB100. Пирамида Берковича нано режим: а) кинетическая объемная твердость  $H_{vob}$  N/m<sup>3</sup>, в),с) кинетическая плотность энергии PVAб, J/m<sup>3</sup>. d) Поверхностная кинетическая твердость  $HI(h,m)$ ,N/m<sup>2</sup>.



a)

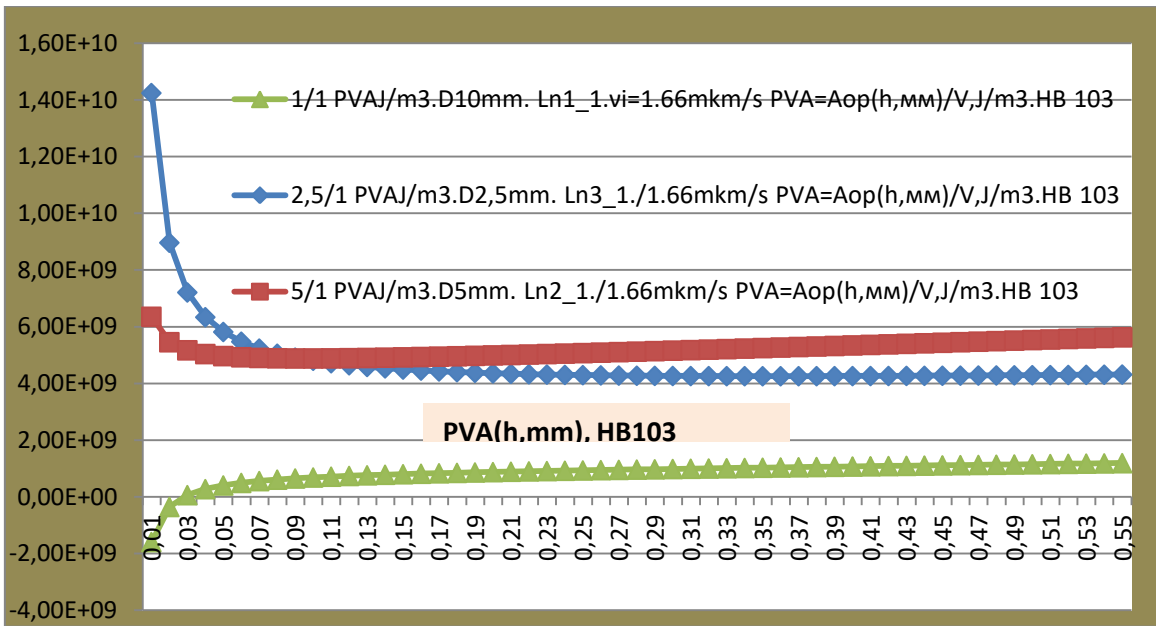


b)

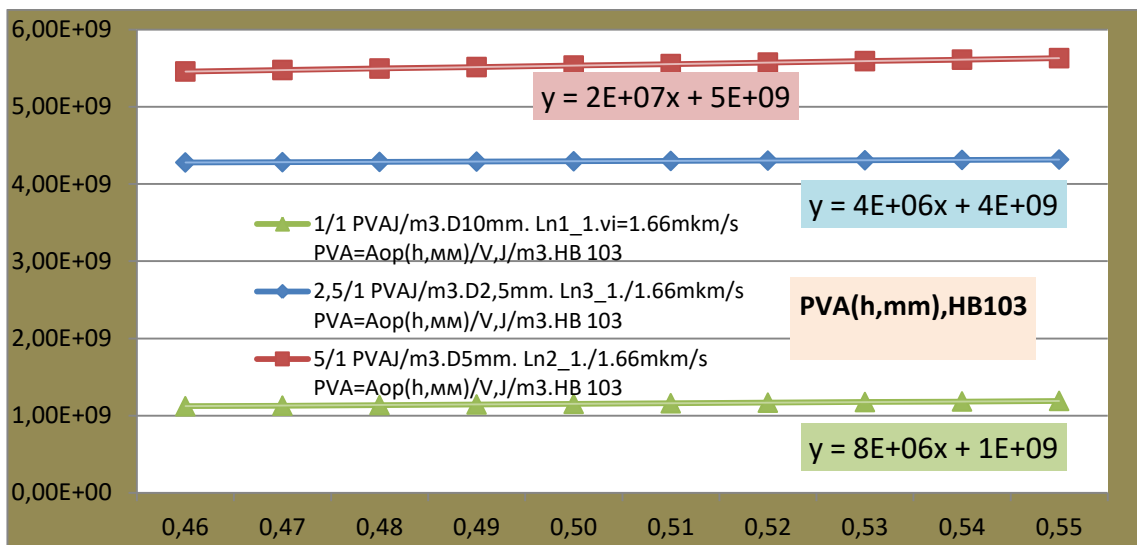


**Рис. 10a,b,c,d.** Результаты обработки кинетических испытаний образцов мер твердости HB103/411. Индентор пирамида Виккерса: а) - кинетическая плотность энергии PVAб, J/m<sup>3</sup>; в), с) кинетическая объемная твердость  $H_{vob}$  N/m<sup>3</sup>; d) Поверхностная кинетическая твердость  $HI(h,m)$ , N/m<sup>2</sup>

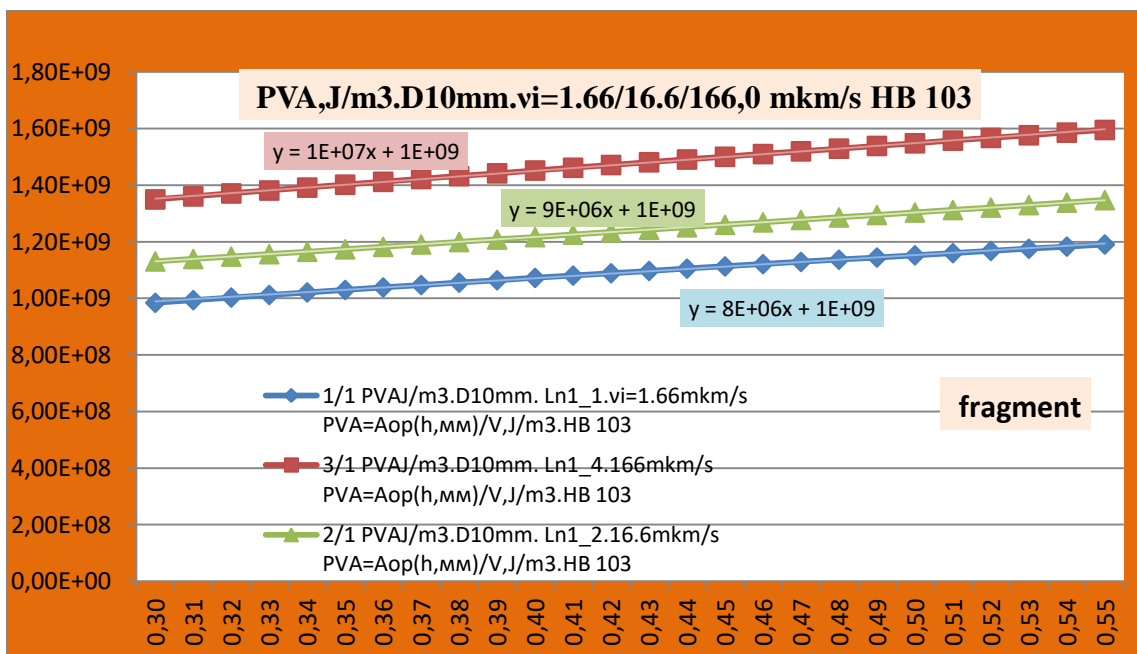
В предыдущей части данной статьи, в частности, была показана скорость тангенциальной компоненты относительных линейных деформаций контактной поверхности для нано инструмента. Нано скорость  $\dot{\epsilon}_r$  приближенно в 1000 раз (на три порядка) выше, чем для макро режима. При сравнении режима макро поверхностного индентирования, микро и нано индентирования сферой, на образцовых мерах различной твердости HB103 и HB41, был получен подобный результат. Кинетическая плотность энергии и твердость нано или микро режимов индентирования, соответственно растет в 2-3 раза при соответствующем уменьшении до нано или микро размеров индентора. Присутствует устойчивая корреляция между ростом скорости относительной деформации, ростом твердости (плотности энергии) при малых величинах активированного объема индентирования.



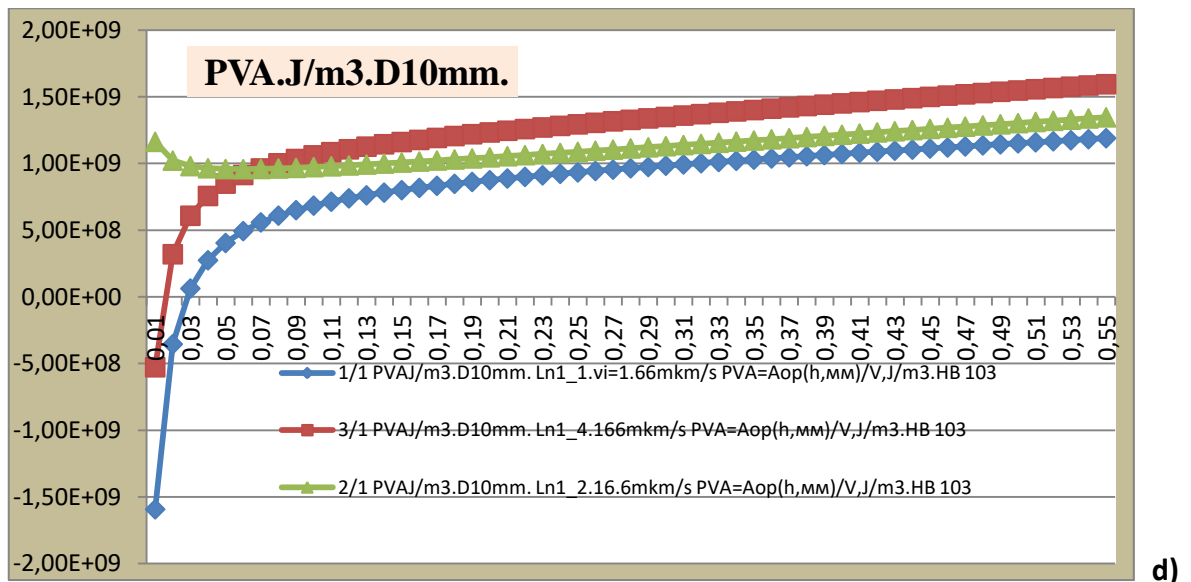
a)



b)



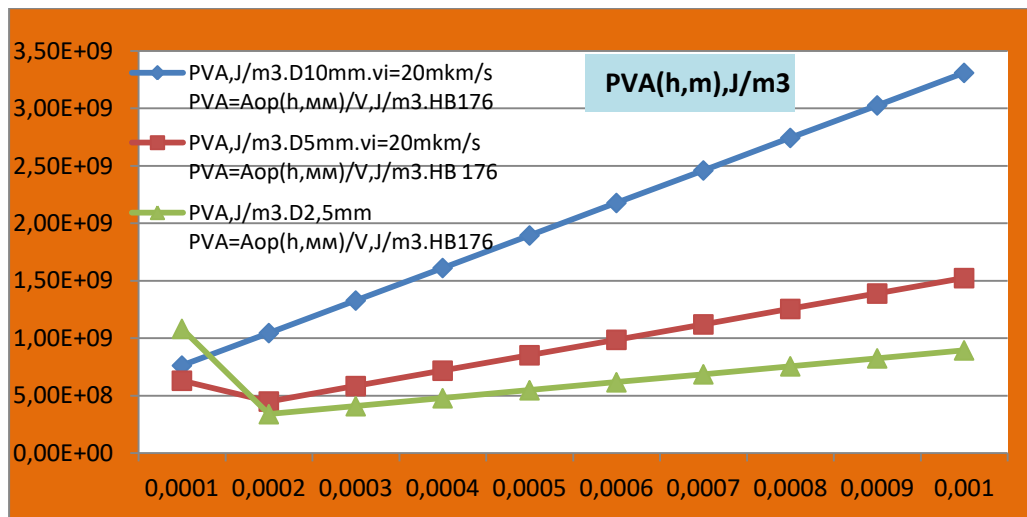
c)



**Рис.11 а, в, с. Влияние скорости индентирования на плотность энергии:** а) - Кинетические диаграммы плотности энергии индентирования PVA при трех разных скоростях, мера HB103, D2,5/5./10.mm; б) фрагмент первой диаграммы; в) -сопоставление функций PVA(h), HB103, D10mm, три скорости, фрагмент диаграммы, д) – влияние скорости на характер функции PVA(h,mm) на первом этапе установления устойчивого физического процесса индентирования, D10, HB103. Данные индентирования профессора В.И. Мощенок ХНАДУ.

Отметим, что в физической теории прочности, на основании обработки экспериментальных данных, установлено, с ростом скорости пластического деформирования однозначно возрастает удельная мощность процесса необратимых разрушений материала. Получены соответствующие зависимости [13]. Высокая скорость относительных деформаций контактной поверхности малых активированных объемов сопровождается мощными локальными процессами ротации энергии структурных преобразований, высокими удельными необратимыми потерями энергии на разрушительных процессах. Далее такой процесс мы называем режимом большой плотности трансляционно-ротационного процесса разрушения структурно физических свойств материала. По аналогии с гидромеханикой это режим высокой турбулентности активированного объема. В нашем случае, при разрушении структурных взаимодействий индентированного тела у контактной поверхности возникает большая ротация (турбулентность) потоков микроскопической энергии волн-квазичастиц. Далее мы особо обозначим начальный активированный объем индентирования малой величины.

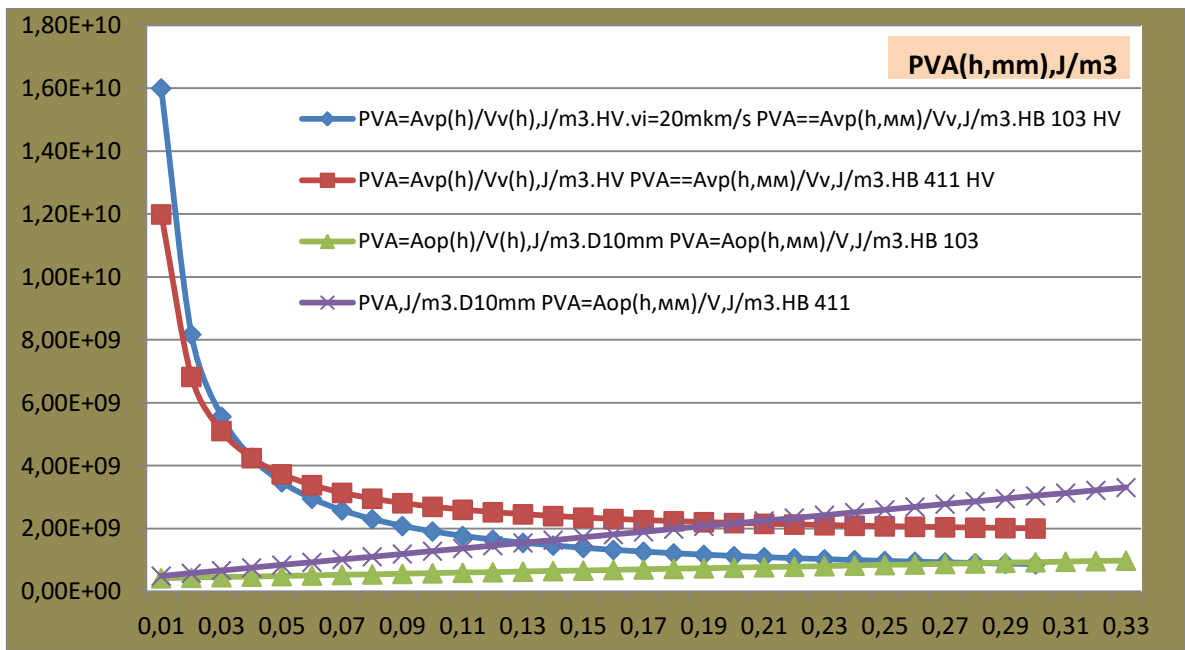
На Рис. 11 показан характерный вид кинетических зависимостей плотности энергии индентирования PVA(h) от скорости перемещения индентра  $v_i$ , образцовая мера HB103, сфера D10mm. Результаты исследований показывают. Твердость HI (h) и удельная энергия  $n$  PVA(h) формоизменения материала, возрастают с увеличением скорости индентирования. Показатели PVA(h), HI (h) возрастают так же при уменьшении диаметра сферы и при уменьшении значения удельной контактной поверхности  $X(h)$ , Рис.7.



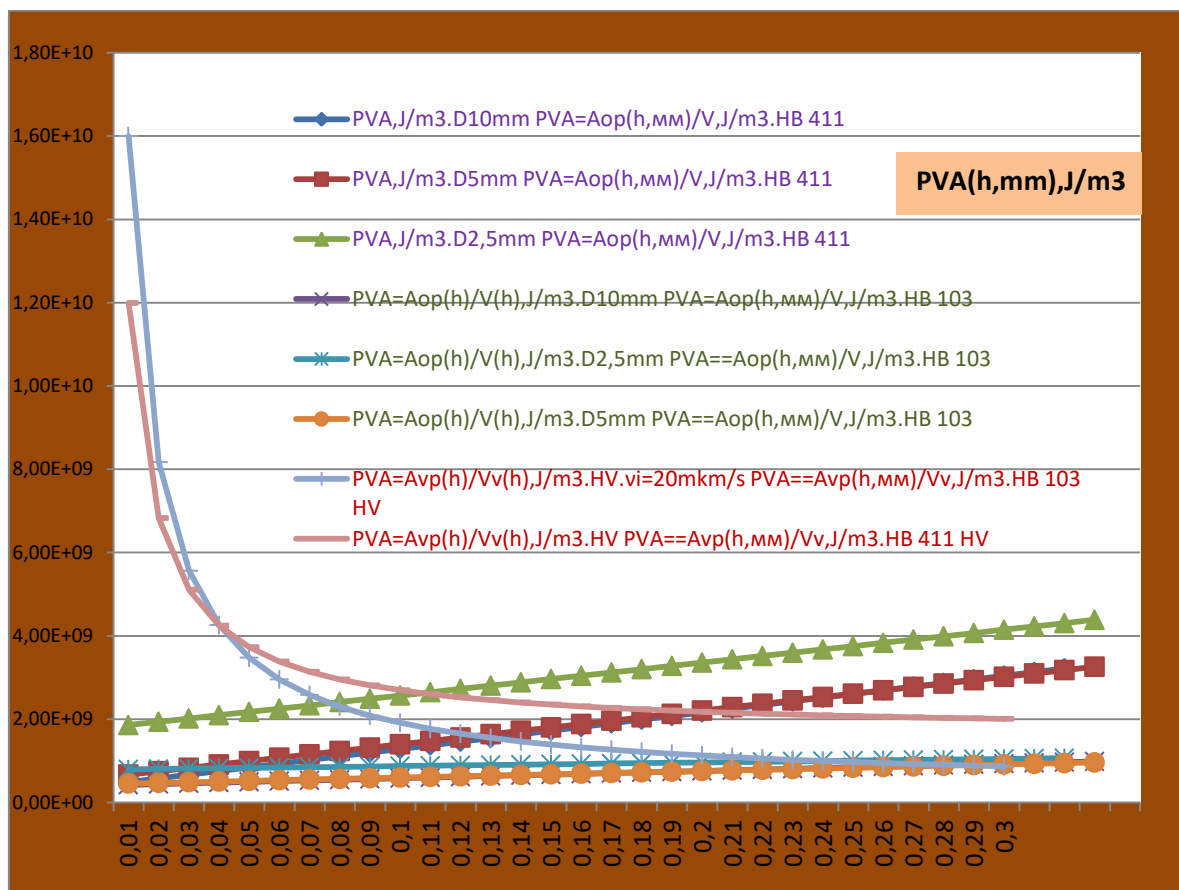
**Рис.12.** Неустойчивый характер кинетических диаграмм присутствует на начальном этапе PVA(h),  $h < 0,2\text{mm}$ , для сфер D2,5/5mm. образцовая мера HB176. Для сферы D/10mm диаграмма устойчивая линейная. Исходные данные индентирования профессора В.И. Мощенко ХНАДУ.

Рост скорости индентора сопровождается увеличением твердости на некоторую величину. В предыдущей части статьи установлена зависимость между скоростью и показателем механической твердости индентирования на основании экспериментальных данных. Анализ экспериментальных данных показал. В начальный период релаксации индентирования преобладает распределение работы «механика формы» - приспособление формы поверхности контакта и тела индентора. Начальный процесс (приспособление, релаксация) неоднородный по объему и поверхности. Это свойство подтверждает неустойчивый характер поведения функций на начальных участках диаграмм кинетической твердости  $HI(h)$  и плотности энергии  $PVA(h)$  и др. На Рис. 11a,d, Рис.12. показан характерный вид таких функций, сферический индентор, образцовая мера HB176. Начальный участок характеризуется сменой механизма формоизменения для D 2,5/5.0 mm. Для случая D10mm процесс устойчиво стабильный.

Сопоставим функции  $PVA(h)$ , для сферы D10mm и пирамиды Виккерса. Результаты показаны на примере двух образцовых мер HB411/103. Рис.13. Обратим внимание, на тот факт, что точка пересечения графиков  $PVA(h)$ , полученная при пересечении функций построенных для двух разных инденторов, соответствует значению плотности энергии материала (меры), соответствующей механической твердости Бринелля HBW выбранной образцовой меры (один материал). Таким образом, располагая функциями  $F(h)$ , кинетического процесса индетирования материала, выполненными двумя инденторами, сфера D10mm и пирамида Виккерса, можно аналитически построить их соответствующие функции  $PVA(h)$ . Затем находим (аналитически и др. методом) точку пересечения функций, **Рис.13.** В этой точке (условно обозначим  $h^x$ ), как показали расчеты и сравнения, мы получим значение близкое механической твердости HBW по методу Бринелля. Метод пересчета PVA в HBW рассмотрен далее, в данном случае установлено  $PVA(h^*) = HBW(h^*)$ . Так же предположим, что точка  $h^*$  ограничивает область неустойчивого индентирования.



a)



b)

**Рис.13** Сопоставление зависимостей функции  $PVA(h,mm)$ , для двух инденторов: сфера D10mm и пирамида Виккерса, Две образцовые меры HB411/103. Данные индентирования профессора В.И. Мощенок ХНАДУ. Точка пересечения графиков для одной меры соответствует её твердости HBW .

Период начальной неустойчивости индентирования показан на Рис.12, для наглядности диапазон глубины индентирования увеличен до  $h=1mm$ . Для глубины свыше  $h=0,2mm$  (для данного метода и режима) влияние собственных микроструктурных физических процессов разрушения материала превалирует. После этапа неустойчивости,



релаксации, существенно возрастает удельная мощность и процесс ротация структурных разрушений по трем осям тензора деформаций. Разрушение протекает изотропно, по трем степеням свободы. Растет размер области шарового тензора всестороннего сжатия материала у контактной поверхности. В этот период удельная работа индентирования  $PVA(h)$  более точно характеризует разрушение структуры, прочности материала. Влияние упругой компоненты энергии падает. На этом этапе, предположительно, приращение объема и площади, равномерно и пропорционально перемещению индентора и приращению удельной работы индентирования. Этот этап целесообразно рассматривать в методе оценки параметров физической твердости материала, для индентирования сферой.

Исследуем частный вариант физических условий, при которых наблюдаем процесс стабилизации удельной работы формоизменения материала. В этом варианте можем найти физические условия, при которых возможно равенство приращения физического и условного геометрического активированного объема от перемещения индентора. В таких условиях, по моему предположению, можно определить физическую твердость материала, используя энергетическую характеристику материала  $PVA(h)$ , геометрические параметры этого процесса, исследовать физические условия, при которых плотность энергии индентирования у разных инструментов совпадает или отвечает критерию подобия. Для этой цели рассмотрим свойства аналитической функции плотности энергии кинетического индентирования.

На основании анализа функций аппроксимации экспериментальных зависимостей  $F(h)$  для разного диаметра индентора, пример Рис.14[1], было установлено, что коэффициент  $k_f$  в формуле (8.1) можно представить как новую линейную функцию, зависящую от твердости материала и радиуса сферы.

$$k_f = \alpha_L \cdot R, \text{ где } R \text{ радиус сферы.}$$

Из анализа экспериментальных зависимостей, они близки к линейным функциям

$F(h) = k_f \cdot h$  было установлено,  $\alpha_L$  сохраняется как некоторая корневая константа физико-механического свойства твердости и метода индентирования материала, не зависящая от диаметра сферы. При индентировании сферой относительно больших диаметров, скорость движения индентора поддерживается приблизительно постоянная  $v_i = 0,02 \text{ mm/s}$ , в этом случае константа  $\alpha_L$  зависит только от твердости материала (в данном случае это мера НВ). Было установлено, для  $5,0 > R > 2,5 \text{ mm}$ ,  $h > 0,25 \text{ mm}$ , заданной твердости НВ, константа не зависит от радиуса. Рассматривались образцовые меры НВ 103/176/411. Сравнивались функции усилия для диаметров  $D_{2,5/5.0/10,0 \text{ mm}}$ . При аппроксимации линейной зависимостью  $F(h) = k_f \cdot h$  имеем зависимость:

$$PVA_o(h) = \frac{k_f}{2\pi R} = \frac{\alpha_L \cdot R}{2\pi R} = \frac{\alpha_L}{2\pi} = \text{const.} \quad (7.7)$$

Где,  $k_{fi}$  представлен функцией  $k_{fi} = \alpha_L \cdot R_i$ . Например, по данным экспериментальных функций  $F(h)$ , для HB103, D2,5/5.0/10,0mm, получено среднее значение константы  $\alpha_L = 5200$  МПа.

Подобные расчеты были выполнены для анализа вариантов нелинейной экспериментальной функции  $F(h)$ , с аппроксимацией полином второго порядка. Был получен результат аналогичный линейному представлению нагрузки. Для нагрузки индентирования  $F(h)$ , аппроксимация параболой, была определена другая постоянная  $\alpha_a$ , которая отличается на постоянный множитель от константы  $\alpha_L$ . Расчеты показали следующее. Существует универсальная физическая характеристика, величина твердости материала, которая практически не зависит от диаметра, в диапазоне значений  $10,0 \geq D > 2,5$ mm. Из объединенного анализа зависимости плотности энергии для линейной нагрузки  $F(h)$  (коэффициент  $k_f$ ) и нелинейной функции, представленной полиномом (7.1), можно сделать вывод. Для сферического индентора, диаметром  $10,0 \geq D \geq 2,5$ mm, наблюдается ламинарный (по аналогии с термином гидромеханики) устойчивый энергетический процесс формоизменения (рост поверхности) и формообразования (перемещения массы и преобразования структуры материала). Наблюдаем устойчивый, характерный физический процесс индентирования. Параметры  $\alpha_a$   $\alpha_L$  можно представить как некоторые константы, характеризующие свойства физического процесса измерения твердости материала в данном однородном, изотропном и стабильном состоянии. Такой процесс, поверхностного кинетического макроиндентирования, назовем ламинарным. Эти условия используем далее как эталонный стандартный процесс индентирования. В то же время, такой процесс может происходить с переменной мощностью необратимого преобразования СЭС активированного объема материала. Эта мощность зависит от отношения  $X_{sv}(h) = S/Va$ , где  $S$  образованная контактная поверхность,  $Va$  - объем активированного материала. Свяжем удельную энергию и мощность процесса индентирования с параметром  $X_{sv}(h)$ , Рис.8. Мощность индентирования, как процесса формоизменения и формообразования, в данном случае не зависит от диаметра сферы. Мощность растет с увеличением глубины индентирования, поскольку растет величина  $X_{sv}(h)$ . Далее мы установим эталон, стандарт мощности этого ламинарного процесса независимый от диаметра сферы Бринелля.

### **3.2. Физическая твердость материала, определение, функция, физическая мера. Три метода физического кинетического индентирования.**

Для упрощения анализа функции (7), рассмотрим три варианта аналитического представления плотности энергии кинетического индентирования  $PVA(h)$ . Интегральная, дифференциальная, нано-микро дифференциальная, дополнительно учтем разную форму инструмента. Названия и обозначения характеристик физической твердости предварительные. Обозначим:

$$1. \quad \overline{PH}(h) = PVA(h) = \frac{A(h)}{V(h)} = \bar{f}_H(h) \text{ , J/m}^3 \text{ - средняя интегральная плотность энергии}$$

кинетического индентирования.  $\bar{f}_H(h)$  - интегральная функция энергии индентирования от глубины.

$$2. \quad PH(h) = \frac{dA(F, h, T, E..)}{dV(F, h, T, E,...)} \approx \frac{\partial A(h)}{\partial V(h)} = \frac{A'}{V'} \text{ , J/m}^3$$

Где,  $PH(h)$  - дифференциальная плотность энергии ( $PH$  - physics hardnes)

$\partial V(h)$ ,  $\partial V(h)$  частные дифференциалы и их частные производные соответствующих функций, по переменной  $h$ ,  $T, E$ , физические, механические др. параметры и константы состояния данного материала.

$$3. \quad PHN = \frac{\partial A(h)}{\partial V(h)} = \frac{A'}{V'} \text{ - нано-микро физическое кинетическое индентирование,}$$

инструментом любой формы, при условии  $V(h) \leq V_{pr}(h^*) = V_a(h < h^*)$   $h \leq h^*$ , где

$V_{pr} - 1 \cdot 10^{-21} < V_{pr} < 1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^3$ , малый, высоко активированный объем,

$h^*$  - критическая (нано-микро) глубина активации индентирования. Меньшее

значение  $V_{pr}$  объема – нано режим. Большее значение  $V_{pr}$  активированного объема

- микро режим индентирования.

Отдельно, в завершении, обсудим инженерный метод П.М. Огара и расширенный критерий физической твердости на основе дополнительно дифференциального анализа функции  $PVA(h)$ .

Из (7.5) для сферы получим упрощенную форму записи функции (7) интегральной плотности энергии:

$$\overline{PH}_o(h) = A_o \cdot h + B_o, \text{ Где, } A_o = \frac{a_o}{3\pi R}, B_o = \frac{b_o}{2\pi R}. \quad (8.2)$$

Из (7.7) для пирамиды и конуса:

$$\overline{PH}_v(h) = A_v \frac{1}{h} + B_v, \text{ Где, } A_v = \frac{3b_o}{\beta}, B_v = \frac{2a_v}{\beta}. \quad (8.3)$$

Подобным образом получим упрощенные формулы дифференциальной плотности энергии. Используем частный дифференциал функций плотности энергии и функции объема:

$$PH(h) = \frac{\partial A(h)}{\partial V(h)} = \frac{A'}{V'} \quad (9.1)$$

Для сферы дифференциальная плотность энергии:

$$PH_o(h) = \frac{\partial A_o(h)}{\partial V_o(h)} = \frac{A'_o}{V'_o} = A_o^1 \cdot h + B_o^1, \quad (9.2)$$

$$\text{Где, } A'_o = \frac{a_o}{2\pi R}, B'_o = \frac{b_o}{2\pi R}.$$

Для пирамиды Виккерса:

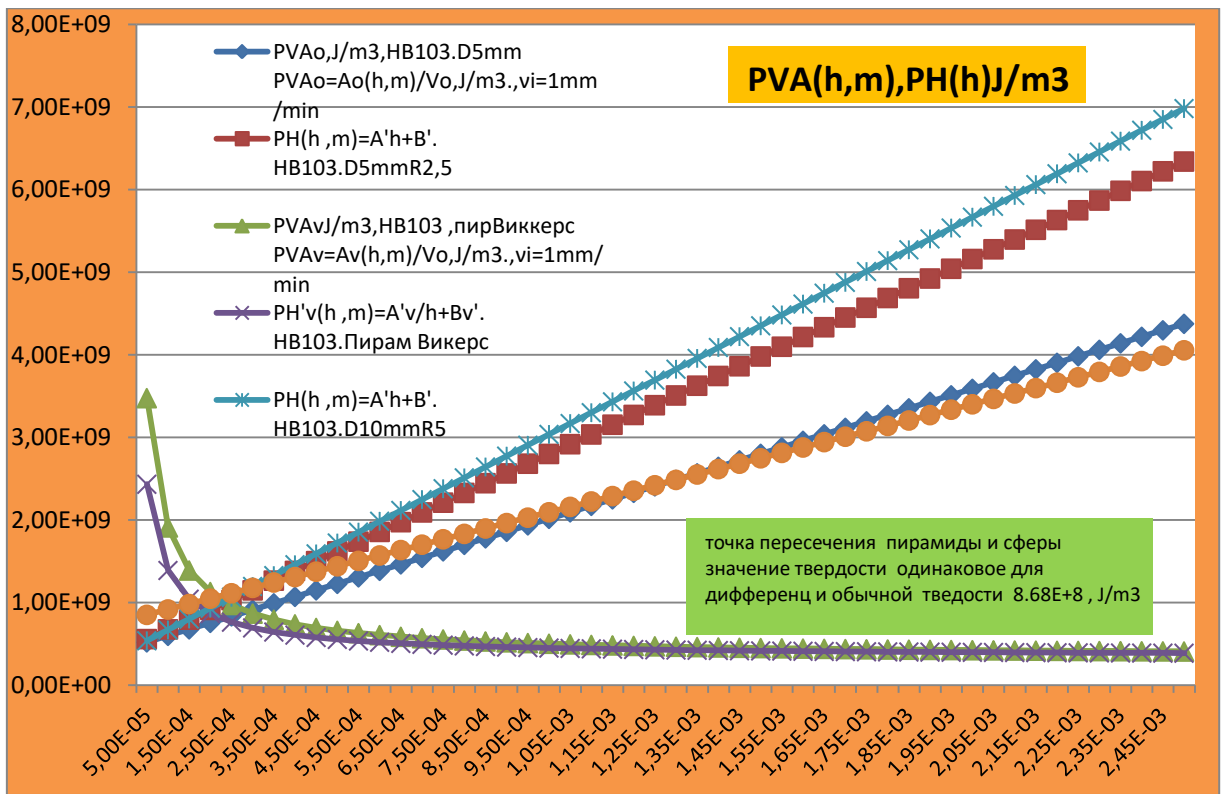
$$PH_v(h) = A'_v \frac{1}{h} + B'_v, \quad \text{Где, } A'_v = \frac{b_o}{3\beta}, B'_v = \frac{a_v}{3\beta}. \quad (9.3)$$

Функция интегральной плотности энергии  $\overline{PH}_o(h) = PVA(h)$  индентора сфера, пирамида в начале процесса имеет в общем случае явно нелинейный характер. Нелинейность вызвана влиянием начального участка мощного процесса активации энергии индентирования, на котором активационный процесс (плотность энергии) обгоняет рост объема  $V_a$ .

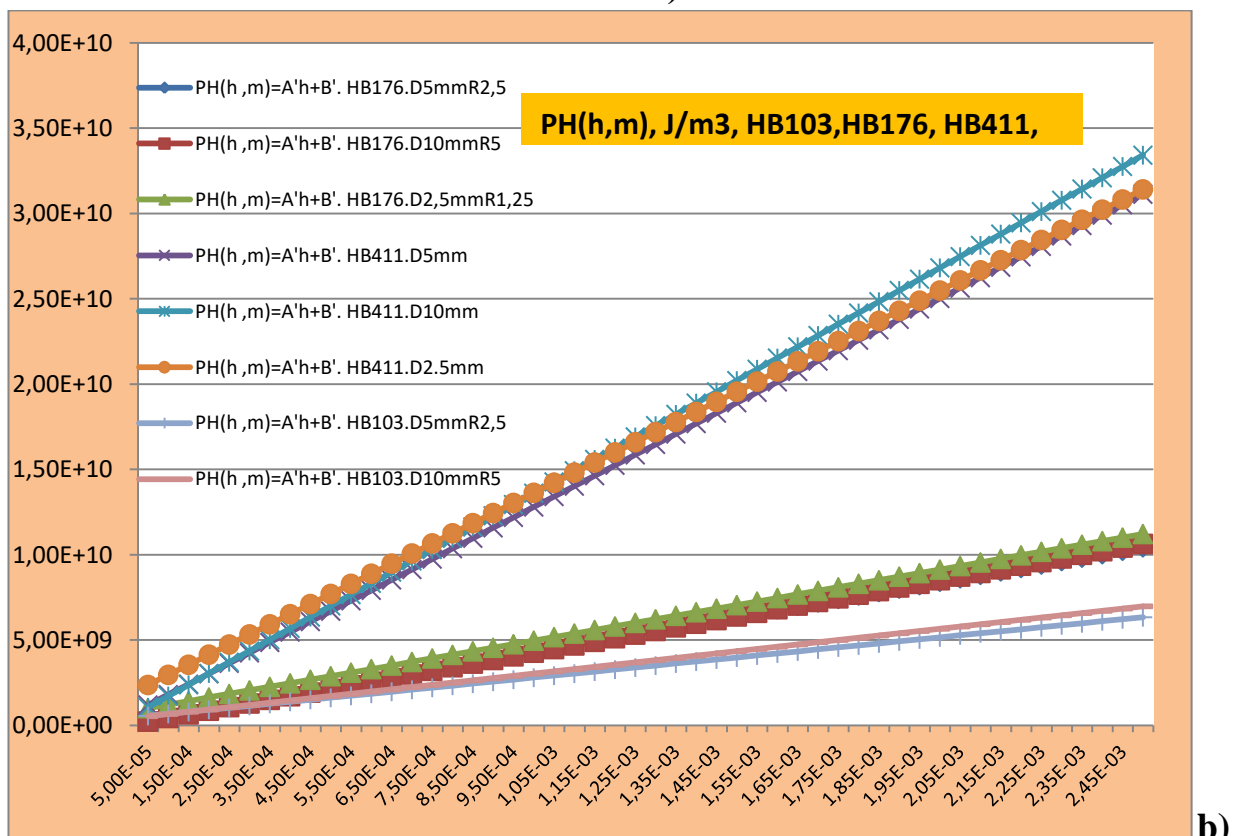
На Рис. 14 для сравнения показаны вместе функции интегральной и дифференциальной (физическая твердость) плотности энергии индентирования сферы и пирамиды, построенные по формулам (7,8,9). Для интегральной средней плотности  $PVA_o(h)$  видим значительное различие значений энергии разных диаметров сферы с ростом глубины  $h$ . Интегральная и дифференциальная плотность энергии для сфер различного диаметра имеет существенное расхождение значений с ростом глубины. На Рис. 15, для меры твердости HB176, показано сравнение средней плотности энергии и дифференциальной физической твердости, для трех сфер D2,5/5.0/10.0mm.

Дифференциальная твердость для сферы характеризуется малым разбросом значений,

Из сопоставления функций средней интегральной и дифференциальной плотности энергии следует, что дифференциальный показатель существенно устойчивей. Разброс значений для разных диаметров относительно малый. Практически мало зависит от диаметра сферы, стабильная линейная функция на всем интервале глубины индентирования. Дифференциальная плотность энергии может быть основой для формирования критерия физической твердости. У пирамиды Виккерса, при достижении определенной глубины индентирования  $h$ , устанавливается постоянное значение плотности энергии, характерное для этого состояния материала. Характер функции дифференциальной твердости для сферы  $PH_o(h)$  и пирамиды  $PVA_v(h)$ , существенно различается, подчеркивая разный механизм.

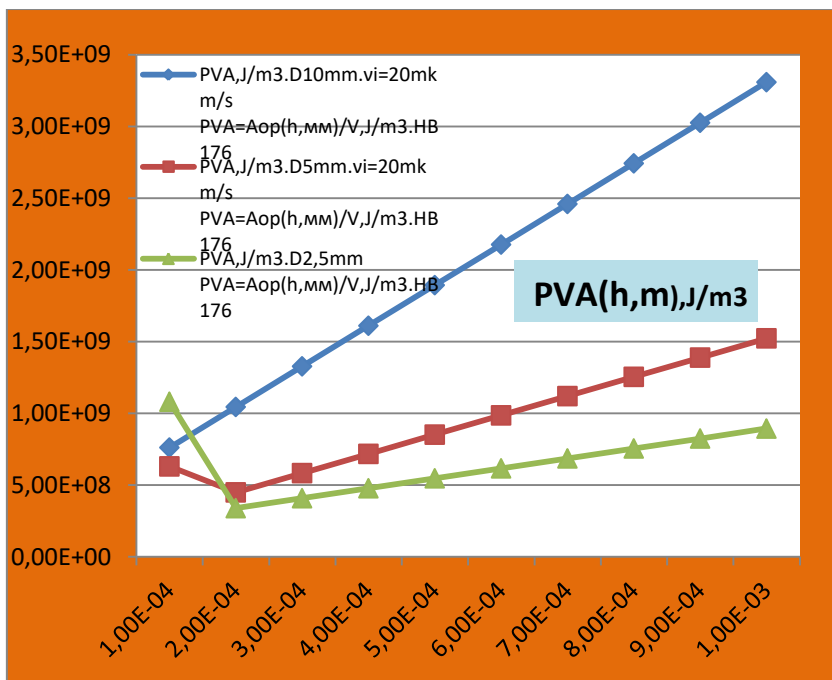


a)

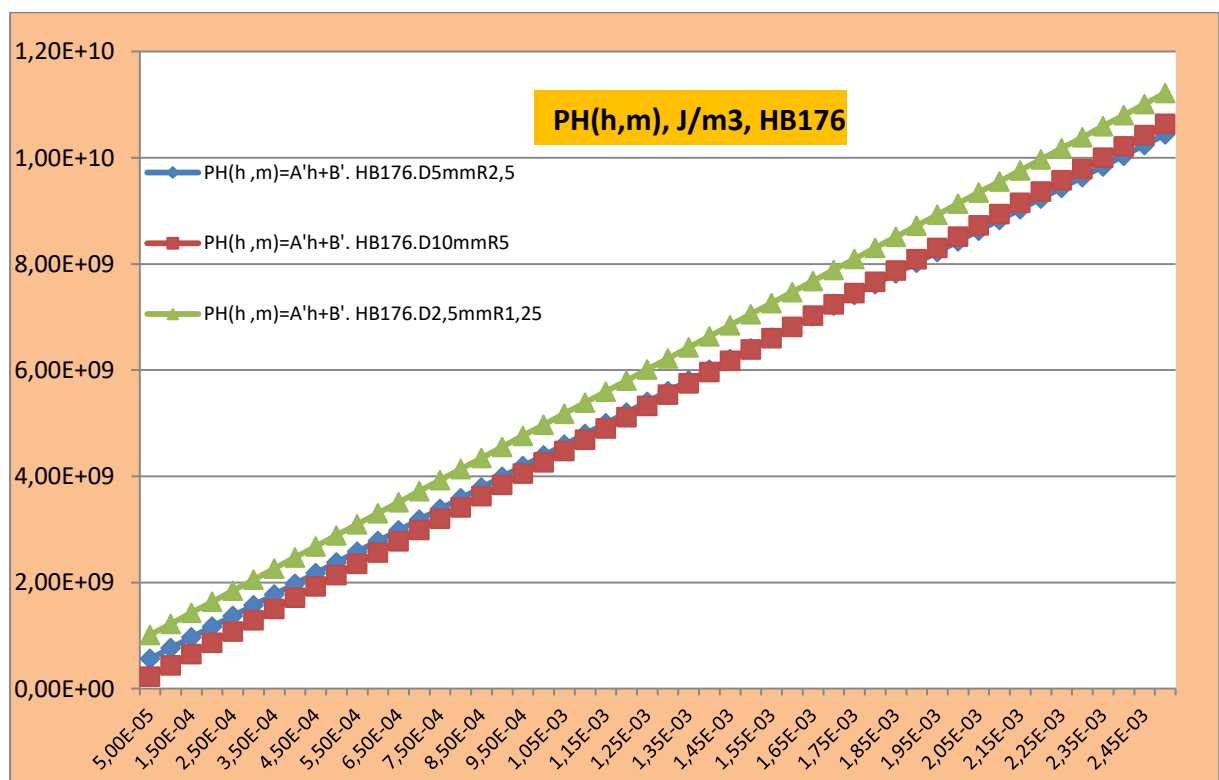


b)

**Рис.14** Сравнение характера функций удельной энергии  $PVA_o(h)$  и дифференциальной твердости  $PH_o(h)$  индентирования сферой D5mm и пирамидой : а) Мера твердости HB103, функция плотности энергии сфера -  $PVA_o(h)$ ; пирамида -  $PVA_v(h)$ , дифференциальная твердость сфера  $PH_o(h)$ ; б) Дифференциальная твердость  $PH_o(h)$  сфера, меры твердости HB103/176/411 из (9.2).



a)



b)

**Рис.15** . Сравнение характера функций удельной энергии инdentирования меры твердости HB176, сферами D2,5/5.0/10.0mm а)  $PVA_o(h)$ , глубина до  $h = 1$ mm; б) Дифференциальная твердость  $PH_o(h)$  инdentирования сферами, глубина до  $h = 2,5$ mm.

## **Физическая твердость материала, определение, функция, физическая мера.**

Обобщим полученные результаты. Сформулируем предварительное определение физической твердости кинетического индентирования. Представим индентирование сферой как эталонный процесс (метод). Обоснуем принципы подобия процессов и показателей физической твердости индентирования, для разных диаметров сферы, при макро режиме. Предложим три метода физического кинетического индентирования. Обсудим физические причины размерного эффекта на примере индентирования сферой. Обоснуем критерии, принципы подобия для трех предложенных методов определения физической твердости.

Для дальнейшего обобщения полученных результатов исследования свойств функций  $PVA(h)$ ,  $PH(h)$  кратко сформулируем определения главных понятий физического подхода.

Мы установили, что кинетический процесс индентирования характеризуется функцией  $PVA(h)$ , которую можно представить как физическую твердость материала. Прежде всего, это некоторый физический процесс, связанный с перемещением массы материала, трансляцией и ротацией SES и образованием новой поверхности в результате перемещения поверхности твердого инструмента индентора в исследуемое твердое тело.

**Индентирование** – изменение формы поверхности материала ДТТ в результате вынужденного механического перемещения абсолютно твердого тела инструмента определенной формы в объем материала. Процесс сопровождается необратимыми структурно-физическими преобразованиями исследуемого материала твердого тела. Контролируемые параметры процесса: усилие на индентор и его перемещение, площадь контактной поверхности  $S$  и активированной поверхности  $S_a$ , перемещенный активацией индентором объем материала  $V_a$ , скорость перемещения (время процесса), заданная температура тела.

Далее две равноправные трактовки твердости.

**А. Физическая твердость индентирования  $PH$ ,  $J/m^3$**  – удельное количество энергии, которое необходимо затратить на перемещение твердого тела инструмента индентирования, заданной формы и размеров (эталон сфера), в исследуемый твердый материал, на заданную величину перемещения  $\Delta h$ ,  $m$ .

Материал однородный, изотропный, внутренний физический процесс индентирования стабильный.

В результате индентирования происходит формирование дополнительной контактной поверхности  $\Delta S$ ,  $m^2$ . Процесс совершается в определенных постоянных физических условиях: скорость перемещения (время), температура тела. Удельная энергия определяется как отношение выполненной работы ( $\Delta A, J$ ) к величине перемещенного объема ( $\Delta V, m^3$ ) испытываемого материала, в результате движения индентора на некоторую величину  $\Delta h$  относительно первоначального положения границы поверхности (начальные условия).

$$\overline{PH} = \Delta A(h) / \Delta V(h), J/m^3 \quad (9.4)$$

В дифференциальной форме, физическая твердость кинетического индентирования  $R_N(h)$ , представляет предел, к которому стремиться величина  $R_N$ , при условии  $\Delta V \rightarrow 0$ . Выражение (9.4) преобразуем через частные дифференциалы и частные производные  $A'$ ,  $V'$  соответствующих функций, по переменной  $h$  (глубина индентирования) в выражение (9.5).

Окончательно, дифференциальная физическая твердость материала - функция, полученная в результате обработки данных кинетического индентирования, аналитическая характеристика процесса кинетического индентирования имеет вид:

$$R_N(h) = \frac{\partial A(h)}{\partial V(h)} = \frac{A'}{V'}, \text{J/m}^3 \quad (9.5)$$

Коротко. **Физическая дифференциальная твердость индентирования** – частная производная работы кинетического индентирования, аналитическая функция физического процесса кинетического индентирования, измерения твердости.

**В. Физическая дифференциальная твердость** – численное значение удельной энергии, величина работы выполненной индентором в результате его перемещения в тело испытуемого материала на заданную глубину, деленная на величину активированного (вытесненного, перемещенного) объема индентированного материала. Работа индентирования – результат преобразования внутренней объемной энергии структурного состояния материала в энергию реакции (усилия) и энергию формирования дополнительной контактной внешней поверхности испытуемого материала. Процесс рассматриваем как вынужденное упругопластическое механическое изменение первоначальной формы материала на заданную величину (перемещение, объем), увеличение поверхности контакта. Индентирование материала происходит в результате механического проникновения абсолютно твердого тела индентора в исследуемое твердое тело, в определенных заданных физических условиях.

Коротко. **Величина физической дифференциальной твердости** – значение (число) функции измерения **дифференциальной кинетической твердости** для **заданной глубины перемещения сферического индентора**.

#### **Аналитическое определение физической твердости.**

Интегро-дифференциальная характеристика кинетического процесса, полученная на основании данных экспериментального исследования параметров индентирования поверхностной макротвердости материала. Определяется интеграл – работа силы индентирования при перемещении инструмента. Затем вычисляется частная производная работы (затраченной энергии) по объему вытесненного индентором тела (не восстановленного отпечатка) исследованного материала. Определяется значение частной производной в заданной стандартной точке  $h_{st}$  диаграммы индентирования - получим число физической твердости (9.5).

Далее, опираясь на определения физической твердости индентирования, можно систематизировать и обобщить результаты анализа различных механических кинетических процессов стандартного индентирования разным инструментом и др.

#### **Дополнительный вариант определения.**



Величина удельной механической энергии (количество работы на единицу активированного объема) затраченной сферическим индентором определенного диаметра на процесс формоизменения исследуемого материала в результате перемещения границы контактной поверхности «индентр материал» на заданную величину. Идеальное индентирование.

Предполагается, что в результате необратимых процессов в активированном объеме тела при вдавливании индентора происходит преобразование механической энергии внешнего источника в энергию структуры материала и поверхности. В результате этого процесса происходит преобразование объемной энергии структурно физического состояния тела в энергию дополнительной, новой поверхности данного материала. Таким образом, предполагается, что физическая твердость отображает необратимые изменения энергетического структурно-физического состояния в объеме испытуемого материала в процессе его формоизменения (индентирования), а именно, трансляционного ротационного движения вещества ДТТ и формирования поверхности контакта инструмента и материала. Индивидуальные SPC

(структурно физические свойства) качества материала отображаются в величине удельной энергии рассеянной в активированном объеме ДТТ, в результате формоизменения и формирования некоторого количества удельной (на единицу активированного объема) контактной поверхности материала. Процесс рассматривается при определенной форме инструмента, величине индентированного объема, соотношении объема и поверхности контакта.

Коротко можно сказать. Физическая твердость это количество рассеянной, затраченной энергии, преобразованной в результате индентирования в энергию нового поверхностного и объемного SES данного материала, посредством механического перемещения и увеличения площади границы контакта инструмента и материала, энергия условно отнесена к некоторому активированному объему ДТТ.

Далее рассмотрим определение условной величины контактной поверхности, при условии: задана определенная форма, размер индентора, перемещение, скорость перемещения, температура тела. Индентор сфера. Возможно определение в двух вариантах: истинной и относительной величины физической твердости. Рассмотрим второй вариант.

### **Три метода физического кинетического индентирования.**

Исходя из результатов анализа и обобщения свойств физических кинетических макропроцессов, характера роста функции плотности энергии, свойства функций площади поверхности индентирования и др. полученных для разных методов и инструментов, на разных мерах и материалах, разделим стандартные процессы кинетического не восстановленного индентирования на *три разных физических метода*.

1. **Первый метод** - индентирование **сферой** (макро режим, поверхностный).
2. **Второй метод** - индентирование **пирамидой, конусом**. Представим второй метод индентирования как сложный микро и макро поверхностный процесс. Начальный этап только нано-микро, затем совместный процесс.

### 3. Третий метод. Нано-микро индентирование инструментом разной формы.

Первый и второй методы, процессы с различной обобщенной скоростью роста функции плотности энергии активированного объема  $PVA(h)$ . Вид функции зависит от глубины индентирования и формы инструмента. Скорость индентирования приблизительно постоянная.

Нано и микро индентирование. Метод мало зависит от формы инструмента. Процесс необратимых микроскопических структурно-энергетических физических изменений свойств материала в малом объеме, с высокой обобщенной удельной мощностью. Функция плотности энергии  $PVA(h)$  эквивалентна обобщенной физической удельной мощности индентирования. Можно показать, величина перемещения инструмента и время процесса индентирования, связаны однозначно. В **нано и микро** методах, режимах индентирования, мощность внутренних микроскопических структурно-энергетических процессов в несколько раз превышает удельную мощность макро режима индентирования.

Особенности каждого процесса детально рассмотрим при индивидуальном обсуждении метода.

#### 3.3. Индентирование сферой, эталонный процесс. Принцип подобия определения кинетической физической твердости сферой. Первый метод и критерий подобия. Размерный эффект – различный физический механизм процесса.

##### Индентирование сферой.

Выбор сферы как эталона **процесса** индентирования, прежде всего, произошел благодаря рекомендации профессора ХНАДУ В.И. Мощенка. Он рекомендовал его при совместном обсуждении физического подхода, опираясь на научный опыт и интуицию в проблемах индентирования. Его пожелания подтвердили характерные свойства сферы обнаруженные при анализе свойств в кинетическом процессе формоизменения индентированного материала. Кратко результаты.

##### 1. Постоянная обобщенная скорость образования новой поверхности

$$S' = \delta \pi R = \text{const},$$

Где,  $\delta = 2-4$  - эмпирический параметр приближенного расчета площади, см. п. 2.

$$S' = S'_h = \frac{\partial S}{\partial h} \approx \frac{\Delta S}{\Delta h} - \text{обобщенная скорость роста площади индентирования.}$$

Обобщенная скорость постоянная, зависит от  $R$  (частная производная по  $h$ ).

У сферы приращение  $\Delta S$  не зависит от глубины  $h$ , но зависит от приращения  $\Delta h$ :

$$\Delta S = \acute{S} \Delta h, \acute{S} \sim R, \acute{S} = \text{const}.$$

Применяя разные радиусы сферы, при индентировании одного материала, мы обнаружим влияние формы на работу индентирования  $A_p(h,R)$ . Характер влияния размера сферы на функцию плотности энергии (физической твердости) подтвержден аналитическими зависимостями, которые были получены из экспериментальных результатов (см.3.1 ).

2.  $X_{sv}(h) = \frac{S(h)}{V(h)}$ ,  $1/m$  - удельная площадь индентирования,  $X_{sv}(h)$  не зависит

от радиуса сферы, величина обратная глубине индентирования. Удельный параметр площади  $X_{sv0}$ , для разных радиусов сферы одинаковый, при равных значениях глубины индентирования  $h$ . Для сферы  $X_{sv0}(h) = \frac{4\pi Rh}{\pi Rh^3} = \frac{4}{h}$ .

3.  $S'1 = S'2$  симметрия ортогональных компонент скорости роста поверхности контакта, равные деформации и их скорости роста поверхности контакта, соответственно равные мощности процессов необратимых изменений (разрушений) по ортогональным направлениям, в плоскости контактной поверхности. Для пирамиды и конуса процесс необратимых преобразований не симметричный, различается по осям тензора деформаций поверхности контакта  $S$ .

4. Для сфер разного диаметра обнаружено подобие физических процессов индентирования. Для сферического индентора  $5,0 > R > 2,5 \text{ mm}$ , наблюдается ламинарный (по аналогии с термином гидромеханики) устойчивый энергетический процесс формоизменения и роста поверхности контакта. Геометрические свойства формы сферы позволили аналитически выявить первые признаки существования критерия физического подобия процессов кинетического индентирования. Были сопоставлены данные плотности энергии (далее физической твердости) при изменении глубины индентирования (эквивалентно изменить площадь контакта, усилия) для разных диаметров сферы. Расчеты были проведены на разных материалах (постоянная мера механической твердости). Меры твердости HB103/176/411.

### **Влияние величины площади образованной сферой на физическую твердость.**

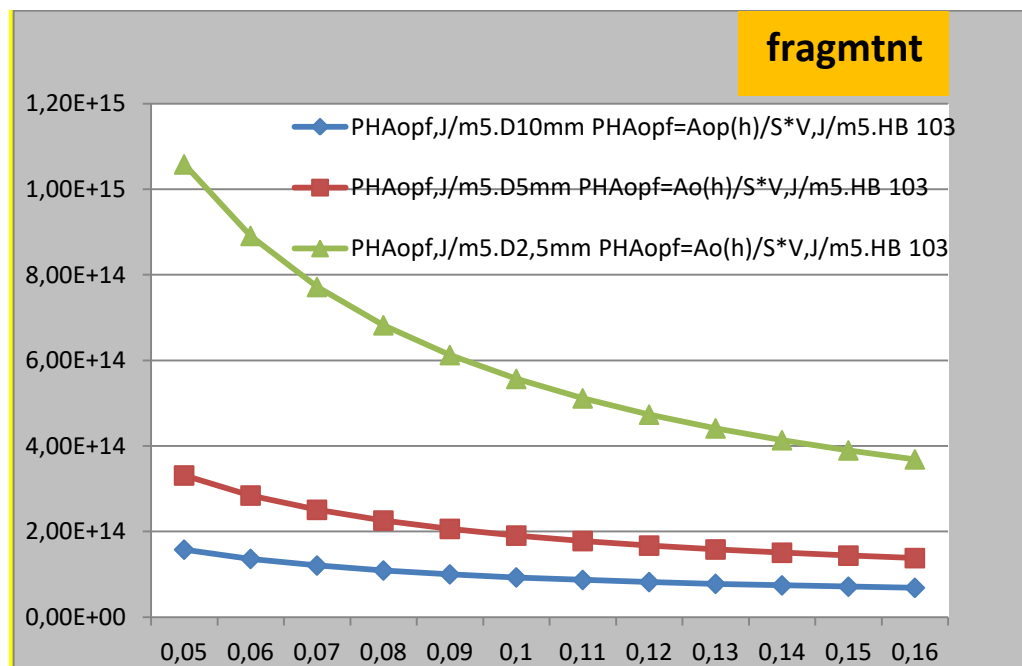
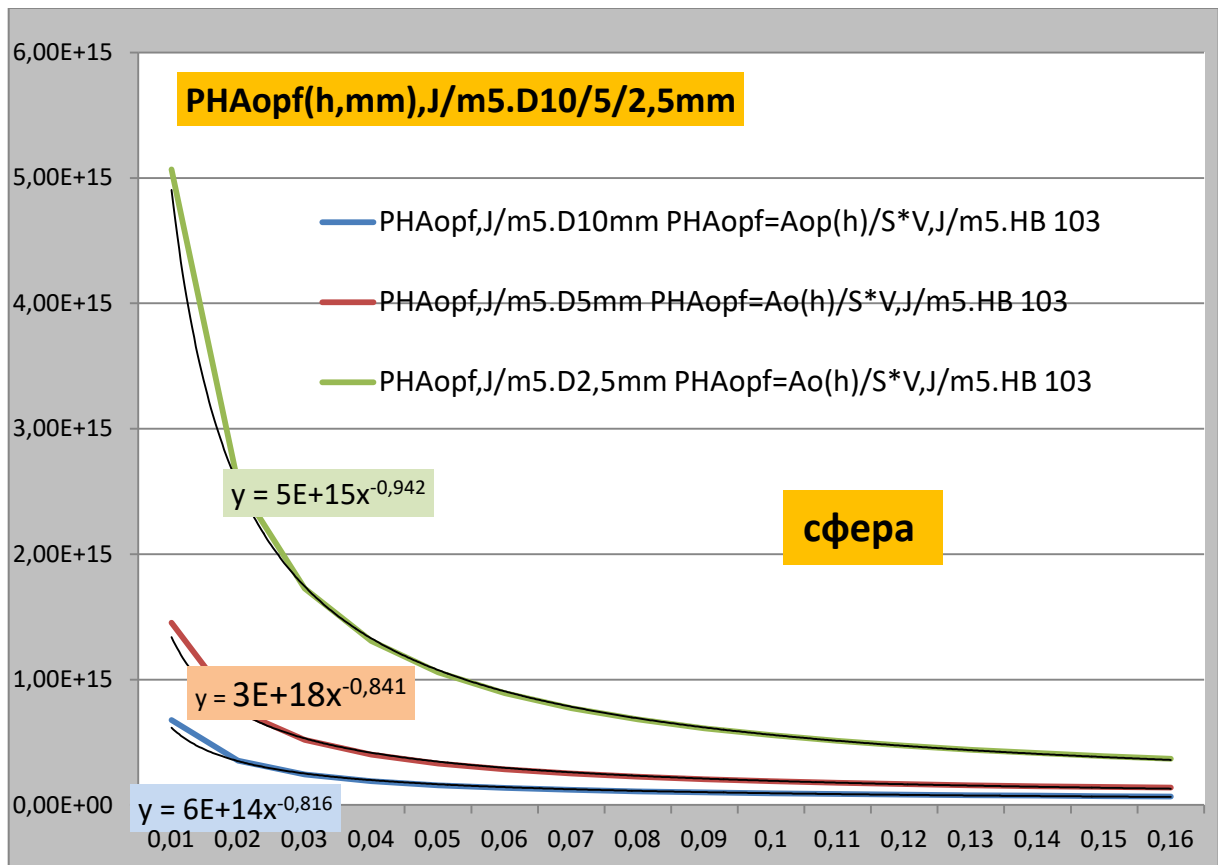
Определим удельную объемную энергию индентирования приходящуюся на единицу образованной площади - РНА,  $J/m^3$ , (10). На Рис. 16 показан характер зависимостей  $РНА(h, \text{mm})$ . Таким образом, найдем работу необходимую на образование единицы площади поверхности  $S_0$ , в результате превращения объемной энергии пластического индентирования в поверхностную энергию контакта, в зависимости от диаметра сферы:

$$РНА = \frac{A(h)}{V(h)S(h)} = \frac{\int_0^{h(t)} F(h)dh}{V(h)S(h)}, \text{ J/m}^3. \quad (10)$$

Развивая понятие критерий подобия процесса индентирования PD - physics discriminant, (физический критерий твердости), обозначим дополнительно величину:

APDA - ascertain physics discriminant, установленная физическая твердость, ascertain – установленная (eng).

APDA<sub>о</sub> - установленная физическая твердость, величина физической твердости к которой асимптотически стремится значение РНА<sub>о</sub> с ростом глубины индентирования. Пример Рис.16. Из табл.1 видим связь и подобие параметров APDA(D,hmm) , J/m5.



**Рис. 16.** Зависимости удельной объемной энергии РНА(h, mm) , J/m5, деформирования сферой Бринелля разного диаметра образцовой меры HB103. Фрагмент для разных диаметров. По данным экспериментов [1].

С уменьшением диаметра шара твердость РНА растет, связь обратно пропорциональна активированному объему V. Хорошо видна корреляция основных величин. В Табл.1 видим, что увеличение физической твердости в 4 раза вызвано уменьшением диаметра шара индентора и соответственно уменьшением объема активации, уменьшение площади контакта в 4раз. Расчеты показаны на одном условном материале (мера твердости). Это свойство влияния физических качеств материала на твердость, хорошо проявляется именно на сферическом инденторе. Используя поправку на величину изменения удельного показателя площади X(h), для сферы разного диаметра, мы приходим аналитически к одной величине РНА(h, mm), для данного материала, например значению APDA при диаметре сферы D10mm.

APDA J/m5, установленная физическая твердость, сфера, HB103. (по данным [1]). Таблица 1.

Параметр Образец HB103 .i = D1/Di	D10мм R1=5E-3m 1 1.0	D5мм R2=2,5E-3m 2 2.0	D2,5мм R3=1,25E-3m 3 4.0	commentary
APDA =Const, J/m5 $\alpha_{ph} = \frac{APDA_i}{APDA_{10}}$	0,95E+17 1	1,85E+17 1,95	4,15E+17 4,4	Обратная зависимость
h,mm	0,33	0,33	0,33	
Vo,m3 $\beta_{ph} = \frac{V_{10}}{V_i}$	1,7E-9 1	0,855E-9 2	0,427E-9 3,98	$\beta_{ph}$ - обратная величина относительно $\alpha_{ph}$
S(h),m2 $\gamma_{ph} = \frac{S_i}{S_{10}}$	10,04 E-6 1	5,18E-6 2	2,59E-6 4	$\alpha_{ph}$ и $\gamma_{ph}$ подобны. Обратная зависимость

В Таблице 1 для зависимостей между параметрами и величинами использованы обозначения (10.1), (10.2):

$$\alpha_{ph} = \frac{APHA_i}{APHA_{10}} = \frac{V_{10}}{V_i} \quad (10.1)$$

$$\alpha_{ph} = \frac{APHA_i}{APHA_{10}} \quad \beta_{ph} = \frac{V_{10}}{V_i} \quad (10.2)$$

Из результатов сравнения и анализа видно, что критерий РНА, J/m<sup>5</sup> асимптотически стремится к некоторому пределу, его можно предположительно рассматривать как величину физической твердости данного материала, обозначено **APDA - ascertain physics discriminant**. Между значениями твердости APHA<sub>0</sub>, полученными на разных диаметрах, видна устойчивая зависимость. Эту величину правильнее называть свойством системы физического формоизменения в определенных физико-механических условиях испытаний материала. Легко видеть, что одинаковое значение **APDA** можно получить на разных материалах, применяя разный эмпирический метод испытаний. Величина APHA зависит от метода измерений. Для обеспечения однозначности показателя твердости необходимо предложить более строгий критерий подобия или метод сравнения результатов разных методов измерений. Данная величина APHA может рассматриваться как предварительная мера или критерий для обоснования метода определения физической твердости.

#### **Условие однозначности физического процесса индентирования.**

Анализ экспериментальных зависимостей усилия F(h), функций макроповерхностной твердости H(h), физической дифференциальной твердости PNo(h) индентирования сферой достаточно большого диаметра, для однородных материалов (предполагалось, что этим свойством обладают испытанные стандартные меры твердости [1]), позволяет считать, что указанные функции сферического индентирования для однородных и стабильных по структуре материалов, монотонны, непрерывны. Этот вывод справедлив в некотором достаточном для практики интервале значений глубины h\* - h. Графики рассмотренных функций индентирования не пересекаются, имеем «веер» кривых. Таким образом, имеем стабильный, монотонный физический процесс структурно-физических преобразования в термомеханической системе материал - индентор-механизм нагрузки. Следовательно, значения функции плотности энергии процесса индентирования PNo(h) однозначная характеристика состояния, физического процесса в данной системе. Каждое значение функции PNo(h), является однозначной характеристикой данного материала в рассматриваемом процессе, свойство функции состояния. Подобным примером однозначности, является уравнение состояния идеального газа, решением которого будут изотермы, изобаты процесса и др. Данное свойство функции физической твердости позволяет определять, сравнивать состояние свойства материала в процессе необратимого изменения его свойств индентированием, изменения его свойств механической нагрузкой и т.п.

При индентировании конструкционных материалов имеет место отклонение от идеального процесса (кривые пересекаются, имеют изломы и др.). В этом случае следует применять дополнительные модели, функции и др. для практического применения функции и числа физической твердости индентирования.

### Следствие.

Из анализа результатов индентирования сферами разного диаметра (например, формула (7.7), другие в статье не показаны), вытекает **следствие**, которое мы используем для формирования первого критерия подобия физической твердости: *У сферического индентора достаточно большого диаметра  $2,5 < D < 10 \text{ мм}$ , начиная с некоторого малого значения глубины  $h^*$ , наблюдается в характере функции энергии  $PVA(h)$  стабильный, линейный процесс физического индентирования. Далее он называется ламинарный физический процесс индентирования.*

На основании обобщения совокупности рассмотренных качеств индентирования сферой сформулируем понятие – стандартный или эталонный процесс, определим физическую меру твердости, физическую меру эталонного процесса кинетического индентирования сферой.

Установим стандартный, эталонный *процесс* (standart hardnes) или *физический* алгоритм, процесс измерения твердости. Он характерен для относительно большого диаметра индентора  $D_{2.5} — 10 \text{ мм}$ . Определим на кинетической диаграмме  $PH(h)$  число соответствующее эталону физической твердости, которое обозначим  $PH_{st}$ .

Рассмотрим предварительный эталон (стандарт) кинетического процесса индентирования сферой. На его основе сформируем правило определения физической эталонной меры твердости (алгоритм измерения), определим standart hardnes число  $PH_{st}$ . Далее можно на практике уточнить выбор значения  $h_{st}$  (меры глубины) и соответственно эталона физической дифференциальной твердости  $PH_{st}$ . Для примера используем меры твердости (как образец материала). Далее используем в тексте термин стандартная (эталонная) физическая твердость и его обозначение  $PH_{st}$ .

### Индентирование сферой, эталонный процесс.

Материал: три меры твердости HB 103/176/411

Индентор сфера  $D=10/5/2.5 \text{ мм}$  ( $R= 5/2.5/1.25 \text{ мм}$ )

Исходные экспериментальные функции индентирования:  $F(h)$ , см.ч1а, Рис.2

Параметры аппроксимации заданы (коэффициенты полином).

Функции дифференциальной кинетической физической твердости  $PH(h)$  указанных материалов Рис. 14,15.

Для сферы дифференциальная твердость из (9.2), при идеальном процессе:

$$PH_o(h) = \frac{\partial A_o(h)}{\partial V_o(h)} = \frac{A'_o}{V'_o} = A_o^1 \cdot h + B_o^1,$$

$$\text{Где, } A_o^1 = \frac{a_o}{2\pi R}, B_o^1 = 0.$$

Назначим эталонный *стандартный процесс* – значение физической дифференциальной твердости  $RH_{st}$  инденитрования сферой при достижении *эталонной (стандартной) глубины*  $h_{st} = 0,25\text{mm} = 0,25 \cdot 10^{-3}\text{m}$ . Найдем работу процесса по определенному формоизменению объема инденитрованного тела.

$$RH_{st}(h_{st}) = A_o^1 \cdot h_{st} = \frac{a_o}{2\pi R} h_{st} \quad (10.3)$$

Определим для глубины  $h_{st} = 0,25\text{mm}$ , разного материала (меры твердости), для трех разных диаметров сферы значение физической дифференциальной твердости  $RH_{st}$ . Значения показаны в Таблице 2. Данный эталонный момент инденитрования, при глубине  $h_{st}$ , характеризуется собственным значением функции удельной контактной поверхности, которая *не зависит от диаметра сферы* инденитра:

$$X_{sv}(h_{st}) = \frac{Sa(h_{st})}{Va(h_{st})} = \frac{4}{h} = \text{const} \quad , \quad (11)$$

где  $X_{sv}, 1/\text{m}$  площадь контакта сферы  $Sa$  на единицу активированного объема  $Va$ .

Легко показать, что для постоянной скорости инденитрования это будет соответствующее значение времени процесса и мощности формоизменения, с точностью до некоторого постоянного множителя. Очевидно из (11), величина  $X_{sv}(h_{st})$  *инвариантна* значению диаметра сферы (не зависит от диаметра).

Для случая стандартной глубины  $h_{st}$

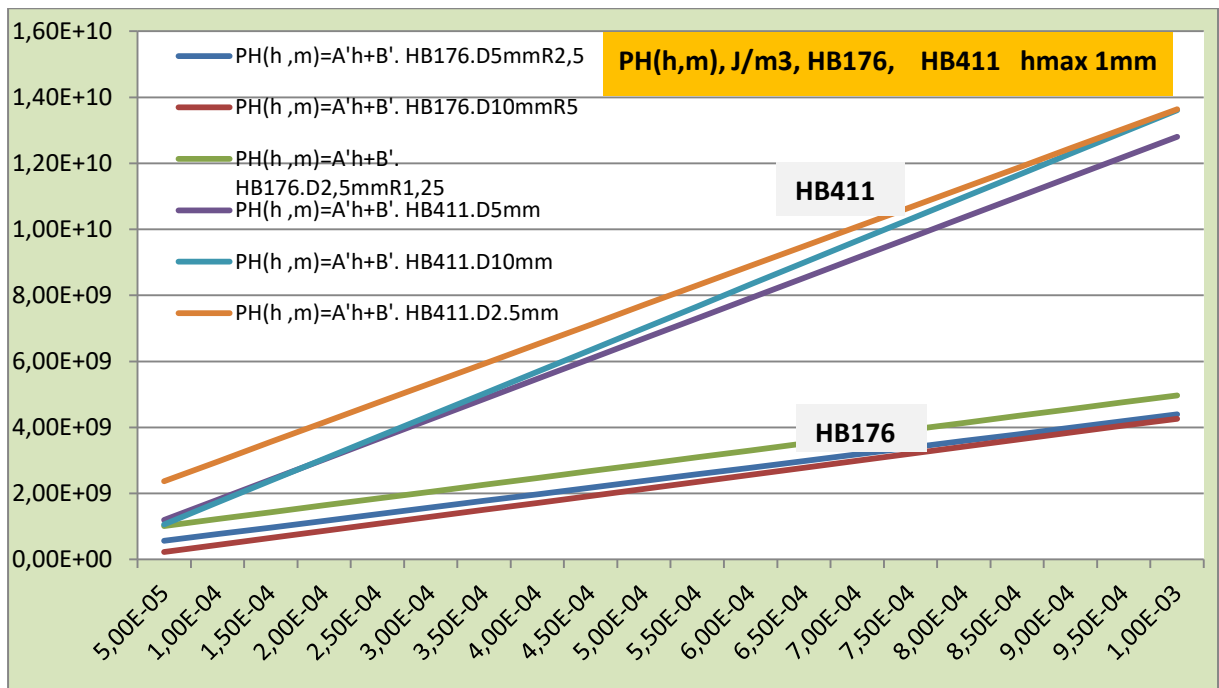
$$X_{sv}(h_{st} = 0,25\text{mm}) = \frac{4\pi R h}{\pi R h^2} = \frac{4}{h_{st}} = 16. \quad 1/\text{mm} \quad , \quad \text{Рис.8b}$$

Применим специальное обозначение величины удельной эталонной поверхности контакта инденитрования  $X_{sv}(h_{st} = 0,25\text{mm}) = \mathbf{TR}$  – *главный критерий эталонного процесса инденитрования*. Это критерий подобия для каждого инденитора сфера  $5,0 > R > 2,5\text{mm}$  (можно назначить любой диаметр в интервале). Критерий  $\mathbf{TR}$  необходим для расчетов коэффициента подобия, при инденитровании сферой, сравнения числа физической твердости на разной глубине  $h, \text{mm}$  (разное усилие  $F, \text{N}$ ) ламинарного кинетического инденитрования:

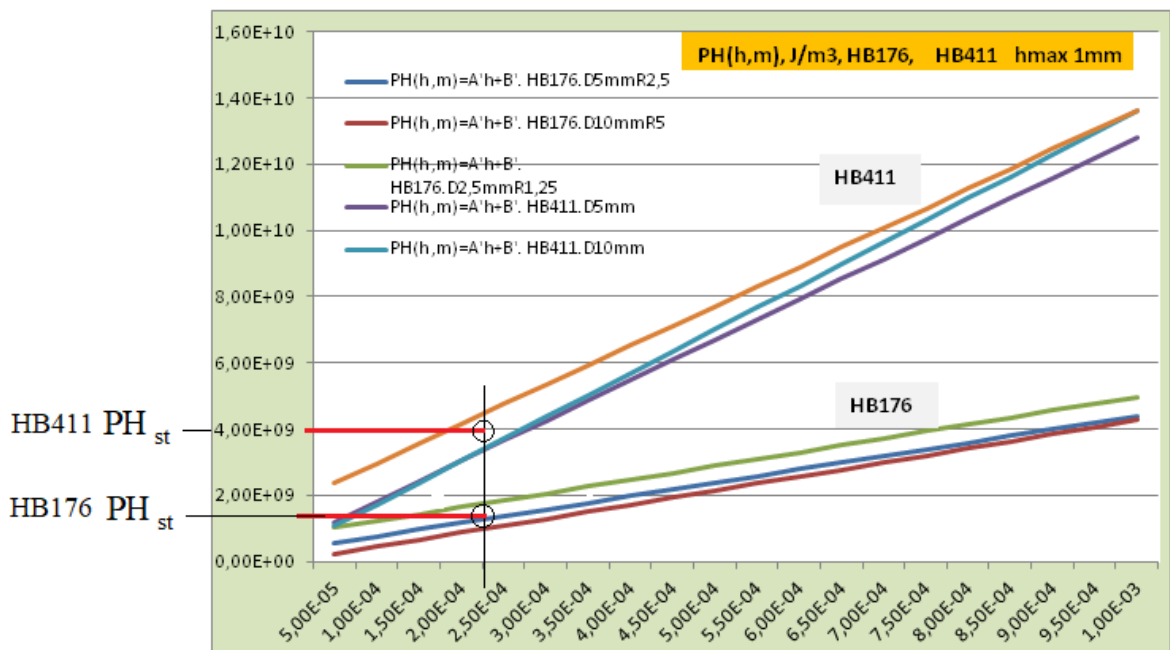
$$\mathbf{TR} = X_{st} = 16. \quad 1/\text{mm} \quad , \quad h_{st} = 0,25\text{mm} \quad (12)$$

Величина  $\mathbf{TR}$  представляет *физическую меру* измерения твердости материала при механическом кинетическом инденитровании. Из этого следует, что существуют и другие методы физического инденитрования, например ударные, тепловые и др.





a)



b)

**Рис. 17.** Определение эталон - стандарта твердости материала  $PH_{st}$ , на примере двух материалов (меры HB176/411), D10/5/2,5/: а) Исходные кинетические диаграммы физической дифференциальной твердости  $PH(h)$ ; б) Стандартный процесс, глубина  $h_{st} = 0,25\text{mm}$ , определены значения  $HB411 PH_{st} = 4 \cdot 10^9, \text{J/m}^3$ ,  $HB176 PH_{st} = 1.45 \cdot 10^9, \text{J/m}^3$

Из расчетов формулой (9.2), в Таблице 2 показаны средние значения стандартной физической дифференциальной твердости  $PH_{st}$ , значения были определены для трех диаметров сферы D10/5/2,5, меры твердости HB103/176/411.

Эталонная твердость, теоретический расчет для разных мер и диаметров сферы. Таблица 2.

Механическая мера твердости	$RH_{st}$ средняя физическая твердость J/m <sup>3</sup>	Значение стандартной физической твердости $RH_{st}$ J/m <sup>3</sup> , разные меры твердости и диаметры сферы (D,mm).		
HB411	$4.03 \cdot 10^9$	$4.74 \cdot 10^9 (D2.5)$	$3.64 \cdot 10^9 (D5)$	$3.71 \cdot 10^9 (D10)$
HB176*	$1.45 \cdot 10^9$	$1.85 \cdot 10^9 (D2.5)$	$1.37 \cdot 10^9 (D5)$	$1.08 \cdot 10^9 (D10)$
HB103	$1.05 \cdot 10^9$	$1.11 \cdot 10^9 (D2.5)$	$1.03 \cdot 10^9 (D5)$	$1.07 \cdot 10^9 (D10)$

\*экспериментальные функции нагрузки [1] имели значительный разброс данных, предположительно из-за однородности материала.

Очевидно, значение эталонной твердости  $RH_{st}$  каждой меры практически не зависит от диаметра сферы. Главным или контрольным параметром эталонного процесса индентирования сферой можно считать величину  $TR, 1/mm$ , отношение площади контакта  $S$  и активированного объема  $V$ , формулы (11),(12).

Используя физическую теорию можно показать, что величина главного параметра  $TR$  первого физического критерия индентирования сферой однозначно характеризует обобщенную скорость (мощность) *физического процесса* генерации энергии активированным объемом при создании дополнительной поверхности активированного материала. Активированный объем ДТТ генерирует потоки энергии квазичастиц, которые формируют новое структурно-энергетическое состояние материала, в частности внешнюю поверхность  $S$  твердого тела при взаимодействии с индентором. Энергия индентированного объема преобразуется в энергию поверхности тела. Можно показать аналитически, что в параметре стандартного индентирования  $TR$  отображается скорость (мощность) процесса преобразования энергии.

### **Первый метод и критерий подобия для индентирования сферой. Зависимость.**

Рассмотрим связь между стандартным числом твердости  $RH_{st}$  и произвольными значениями физической твердости  $RH(h), J/m^3$ , полученными для сферы различного диаметра, переменного усилия (равносильно для разной глубины или площади контакта). Определим количественно (числом) критерий подобия процесса измерения физической твердости. Сопоставим плотность энергии  $RH_{st}$  эталонного и произвольного

процесса индентирования сферой  $PH(h)$  при разном усилии, или то же самое, при разной глубине  $h$  или площади контакта  $Sa$ .

$$str = \frac{h}{h_{st}} = h \frac{1}{h_{st}} = h \cdot TR \quad (13)$$

Где,  $str$  - коэффициент подобия сферического ламинарного индентирования.

Рассмотрим на примере меры твердости HB411, функцию дифференциальной твердости индентирования  $PH(h)$ , сферами D10/5/2,5, Рис.18. Из свойств этих линейных функций легко получить соотношение (13) между значением эталонной твердости  $PH_{st}(h_{st})$  и произвольным значением физической твердости  $PH(h)$  материала (меры).

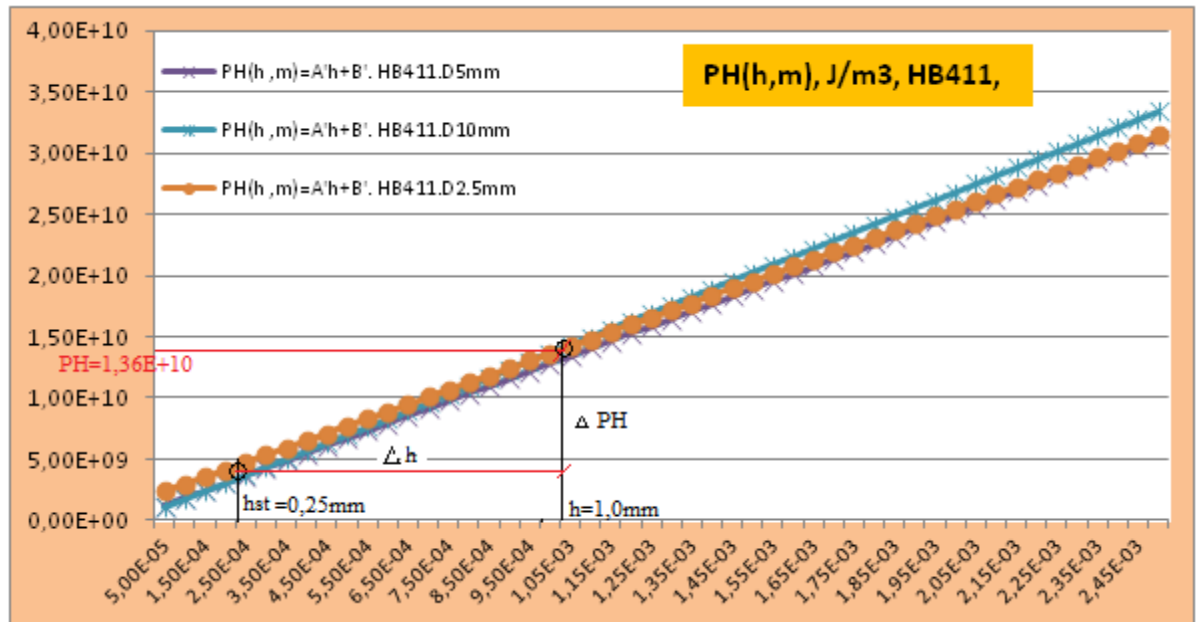
Для простоты, рассмотрим случай  $PH(h) > PH_{st}(h_{st}), h > h_{st}$ :

Из геометрических свойств контактной поверхности для любой сферы:

$$\frac{\Delta S(h)}{S_{st}(h_{st})} = \frac{\Delta 4\pi R h}{4\pi R h_{st}} = \frac{\Delta h}{h_{st}}, \Delta h = h - h_{st}, \Delta S = 4\pi R \Delta h \quad (14)$$

Из свойства графиков функций  $PH(h)$ :

$$\frac{\Delta PH(h)}{PH_{st}(h_{st})} = \frac{\Delta h}{h_{st}} \quad (14.1)$$



**Рис.18.** Графическое пояснение аналитического метода перевода произвольного значения физической твердости на стандартную эталонную твердость  $PH_{st}$  по диаграмме  $PH(h)$  индентирования.

Из (13.1) получим зависимость между величиной эталонной твердости  $PH_{st}$  и произвольным значением физической дифференциальной твердости  $PH(h)$ ,

полученным по полной диаграмме, формулой (9.2), применяя коэффициенты аппроксимации нагрузки  $F(h)$  полиномом (7.1),  $n=2$ :

$$PH_{st} = k_{st} \frac{PH(h)h_{st}}{h} = k_{st} \frac{PH(h)}{str} \quad (14.2)$$

Где,  $k_{st}=1.2-1.35$  корректирующий коэффициент. Физическая природа этого коэффициента будет рассмотрена отдельно.

В данном случае рассмотрен критерий подобия для первого метода индентирования сферой. Пример применения критерия рассмотрен в п.3.5.

### Обсуждение.

Исходя из физической концепции твердости, основным показателем или критерием можно считать величину удельной поверхности  $X_{sv}, 1/m$ , (11). Сферический индентор следует рассматривать как катализатор процесса формоизменения материала. Контактная поверхность сферы  $S$  формирует новую (ответную) поверхность при формоизменении материала. Трансляционно-ротационный механизм структурных изменений - результат внутренних процессов преобразования энергии структуры. Разрушаются волновые взаимодействия в объеме и возникают устойчивые волновые процессы на границе поверхности тела. Физическая твердость  $PH$  характеризует определенную индивидуальную мощность этого термомеханического процесса, при строго определенных физических параметрах в макросистеме. Увеличение нагрузки (глубины, площади контакта) меняет параметр  $X_{sv}$ . Из свойств функции  $PH$  видим, что у сферического индентора происходит пропорциональный рост плотности энергии в активированном объеме. Площадь поверхности контакта сферы пропорциональна глубине. Таким образом, если твердость это удельная энергия необходимая для генерации некоторым активированным объемом  $Va$  определенной площади новой поверхности  $\Delta S$ , то рост удельной энергии, относительно эталонного процесса, означает изменение физических условий этого процесса. Параметр подобия – величина относительного изменения плотности энергии на единицу созданной поверхности контакта.

При сферическом индентировании, созданы особые условия формоизменения материала. Постоянные важные параметры процесса индентирования: температура, обобщенная скорость роста поверхности, симметричный тензор деформаций поверхности контакта. Величины площади контакта однозначно связана с глубиной  $h$ , это позволяет сравнить произвольный процесс  $PH(h)$  и стандарт твердости  $PH_{st}$ .

Используя число подобия  $str$  сферического индентирования, приводим значение произвольной точки кинетической диаграммы  $PH_{st}$  к стандартному процессу (физической твердости) данного материала. Таким образом, для индентирования сферой мы нашли условия подобия *физических процессов*.

В любой точке диаграммы мы можем определить число  $str$  (13), как меру подобия процесса формоизменения и формообразования при индентировании материала.

### **Размерный эффект – результат некорректного сравнения разного физического механизма индентирования.**

Рассмотрим с позиции физического подхода причину возникновения «размерного эффекта» в эмпирических методах индентирования.

Из свойств функции физической твердости, для сферического индентора, очевидно, наблюдается монотонный рост значения плотности энергии  $PН(h)$ . Рост однозначно связан с изменением соотношения плотности энергии активированного объема и величиной контактной поверхности. Размерный эффект возникает в результате сопоставления значений твердости в точках процесса с разными удельными показателями  $X_{sv}$ . Процесс индентирования протекает в разных физических удельных энергетических условиях формирования поверхности. Графики функций плотности энергии и твердости подобны, Рис.20, но это принципиально разные характеристики. В первом случае удельная энергия системы (функция состояния), во втором случае поток работы (условные средние напряжения) неоднозначная характеристика системы. В разных точках диаграммы индентирования  $PН(h)$  сравниваются разные удельные мощности процесса формирования (генерации) активированным объемом твердого тела новой свободной поверхности. При нано и микро индентировании возникают иные физические условия.

Из анализа функций мы установили, рост значения плотности энергии  $PН(h)$  обусловлен изменением (уменьшением) величины удельной площади контактной поверхности. Из сопоставления соответствующих функций следует, имеем одновременный рост потока работы (условных контактных напряжений). Скорость роста напряжений превышает рост скорости контактной поверхности сферы с материалом. В этой связи сопротивление волновому потоку энергии квазичастиц (поток работы напряжений) растет пропорционально глубине, результат этого процесса растет удельное усилие. В эмпирическом методе наблюдаем рост механического эмпирического показателя твердости. В физической концепции индентирования отсутствует размерный эффект, поскольку установлена физическая *кинетическая мера процесса индентирования*. Очевидно, что пропорционально основным параметрам (глубина, сила, площадь) изменяется главная мера **TR** кинетического процесса, при сохранении других физических параметров, температура, скорость роста поверхности и др.

Таким образом, рост усилия у сферы сопровождается пропорциональным изменением физического процесса, возникают новые условия преобразования энергии возрастающего активированного объема в энергию поверхности. Сопоставляя эталон кинетического процесса  $PН_{st}$ , с текущим значением характеристики процесса  $PН(h)$ , мы убеждаемся в физико-механической причине изменений эмпирического показателя твердости. Это обстоятельство «потери» физического процесса при изменении условий

индентирования (рост нагрузки и др.) объясняется исторически как «размерный эффект». Рост глубины индентирования (пропорционально идет рост силы, площади) изменил физический процесс всей TMS (системы). На основании анализа и обобщения системы экспериментальных данных, собранных профессором В.И. Мощенок [1], при определенных условиях кинетического индентирования сферой Бринелля, мы сможем говорить о принципах подобия физических процессов.

### 3.4. Идеальный физический кинетический процесс индентирования. Соотношение поверхностной, объемной и физической твердости.

Для формирования принципов подобия кинетического индентирования сферой разного диаметра используем аналитические свойства идеального физического процесса формоизменения и формообразования твердого тела.

На Рис.19 типичная диаграмма усилия  $F(h)$  кинетического индентирования сферой Бринелля одного диаметра, разные меры твердости.

В работе [1] был предложен метод аппроксимации функции нагрузки на индентор полиномом второго порядка (7.1).

$$F(h) = a \cdot h^n + b \cdot h, N$$

Где,  $a$ ,  $b$ ,  $n$  – константы, полученные по результатам аппроксимации (тренды) экспериментальной функции  $F(h)$ .

Метод хорошо описывает ламинарный процесс индентирования, для сферы диаметром  $2,5 < D < 10 \text{ mm}$ , если материал однородный и стабильный. Если диаметр сферы менее  $2,5 \text{ mm}$ , глубины меньше  $h < 0,25$ , растёт отрицательное влияние микро режима индентирования, нарушается механизм процесса деформирования, Рис.20b.

Предположим, что второй член  $b \cdot h$  функции  $F(h)$  полностью отвечает за вклад (влияние) начального этапа процесса релаксации, начальный неустановившийся этап взаимодействия материала и индентора. В этом случае, условие  $b = 0$ ,  $b \cdot h = 0$ , означает, что *начальный* этап формирования активированного объема, начальные особенности неоднородной структуры, неровности, отклонения от идеальной формы материала образца и инструмента и др. пренебрежимо малы. Функции  $F(h)$  образуют веер парабол, которые имеют начало в точке  $F=0$ ,  $h=0$ .

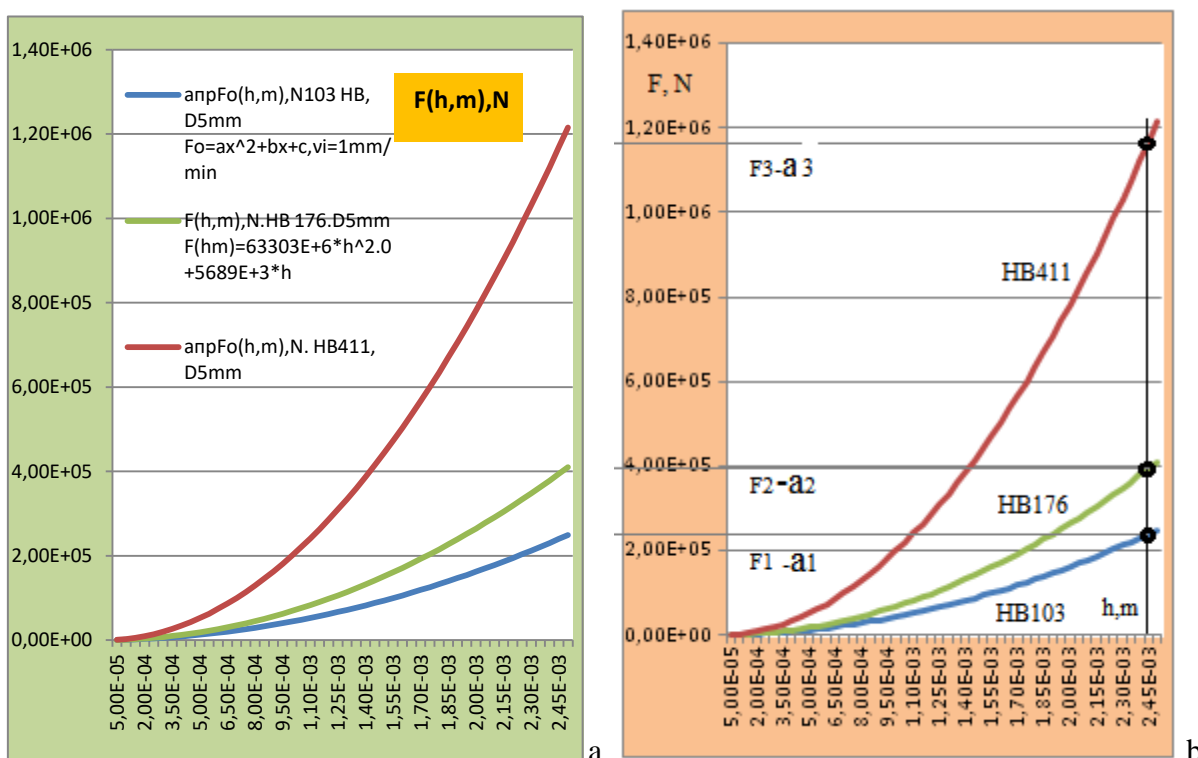
Предположим, что в этом случае для идеального индентора и абсолютно идеального материала процесс формоизменения идет с начальной точки диаграммы  $h=0$ , в момент касания инструментом геометрической условной поверхности тела, второй член (7.1) при этом равен 0.

С точки зрения физического процесса, теперь можно предположить, имеем идеальное индентирование: материал однородный, стабильный, моно компонентный (моно молярный). В этом случае, образование новой поверхности  $S_a$  и формоизменение (перемещение и преобразование SES материала) происходит по одному физическому механизму. В этом случае, каждому значению ординаты (глубины  $h$ ), соответствует одно единственное значение усилия  $F$ . Выполняется условие однозначной связи твердости и параметра  $h$ . При этом выполняется условие однозначности для кинетической эмпирической твердости  $HI, Pa$ , для разного диаметра сферы в ламинарном интервале диаметров, Рис.20b. Для функции дифференциальной кинетической твердости  $PH(h)$  мы

получим так же условие однозначности связи параметра  $h$  и величины твердости (образцовая мера однозначно определяется).

Наклон графиков  $HI(h, D, HB)$  зависит от диаметра сферы и твердости HB, (см. Часть 1, Рис. 6б). Наклон графика функции  $PH(h, HB)$  зависит только от твердости HB Рис.17, диаметр сферы не влияет, эта функция инвариантна диаметру.

На Рис. 19б показана однозначная связь значения усилия на индентор  $F$  от глубины  $h$  для одного диаметра сферы  $D=5mm$ . Для выбранного значения глубины, например  $h=0,25mm$ , мы получим ряд последовательных значений чисел, которые соответствуют некоторому физическому свойству индентирования материала, одному числу аппроксимации  $a_i$  и соответственно одному значению усилия  $F_i$ . Получена некоторая, предварительная шкала физической твердости.



**Рис.19:** а - Характерные диаграммы  $F(h)$  кинетического индентирования сферой Бринелля  $D=5mm$ , материал – образцовые меры твердости HB103/176/411, аппроксимация полиномом, данные [1], б – Однозначность диаграмм в определении усилия  $F$  от перемещения индентора на заданную величину  $h$  для одного размера диаметра макро индентора.

Используя свойства диаграммы идеального процесса ламинарного кинетического индентирования сферой  $2,5 < D < 10mm$ , установим связь кинетической эмпирической и физической дифференциальной твердости, найдем соотношение соответствующих чисел эмпирической твердости для метода Бринелля и физического метода для сферы.

### Соотношение чисел поверхностной эмпирической и физической твердости.

Рассмотрим аналитическую и физическую связь между функциями кинетической эмпирической твердости индентирования  $HI(h)$  и физической дифференциальной твердостью  $PH(h)$ . В частности, получим соотношение эмпирической твердости по

Бринеллю HBW и эталонной физической дифференциальной твердости  $PH_{st}$  (дифференциальная плотность энергии) индентирования первым методом.

Размерность показателя плотности энергии в любом варианте представления формальными простыми преобразованиями приводит к условному давлению, размерности твердости по Бринеллю (напряжению) – эмпирическому показателю механической твердости:

$$[HI] = \frac{N}{m^2}, [PVA] = [PH] = \frac{J}{m^3} = \frac{N \cdot m}{m^3} = \frac{N}{m^2}, [PH] = [HI] = [PVA] = \frac{N}{m^2} = \frac{J}{m^3}.$$

На практике, в эмпирических методах написания числа твердости применяют различные производные указанной размерности, иногда применяют безразмерные числа, называют при этом метод.

Предположим, имеется однородный однокомпонентный стабильный материал. Физический механизм преобразования энергии объемных связей материала в активированном объеме в поверхностную энергию контакта постоянный на всем цикле построения кинетической диаграммы. Материал моно молярный, тело как система из нескольких молярных компонент заменяется на один эквивалентный молярный объем. Графики  $F(h)$  подобны, представляют веер монотонных парабол второго порядка, которые не пересекаются Рис. 19а, 20а. Ранее мы рассмотрели такой идеальный процесс кинетического индентирования сферой. В этом случае, значение твердости однозначная физико-механическая характеристика материала в любой точке диаграммы. Рассмотрим аналитические зависимости твердости кинетического индентирования, для двух случаев расчета, эмпирическим и физическим методом.

Поверхностная эмпирическая твердость кинетического индентирования:

$$HI_o(h) = \frac{F_o(h)}{S_o(h)} = \frac{a_D h^2}{\delta \pi R h} = A_{HI} h, \text{ N/m}^2. \quad (15)$$

Где,  $F_o(h) = a_D h^2$ , идеальная функция нагрузки сферой диаметром  $D$ ,

$a_o$  - коэффициент полиномы функции нагрузки (7.1), сфера диаметром  $D$ ,

$A_{HI} = \frac{a_D}{\delta \pi R}$ ,  $S_o = \delta \pi R h$  - условная площадь контактной поверхности, для эмпирических

методов индентирования сферой,  $\delta$  – аналитический коэффициент, соответствующий методу (восстановленный отпечаток, невосстановленный и др.), принятому в формуле расчета площади контактной поверхности.

Для предварительного анализа свойств макро режимов кинетического индентирования можно принять в первом приближении  $\delta=4$ , поскольку эта величина более точная для расчета активированной поверхности  $S_a$  (см. формулу 4.2). В расчетах эмпирической восстановленной, не восстановленной и др. твердости авторы исследований применяют разные значения, приближенно это  $\delta = 2$  [1].

Физическая дифференциальная твердость, из (9.2) для идеальной диаграммы индентирования сферой:



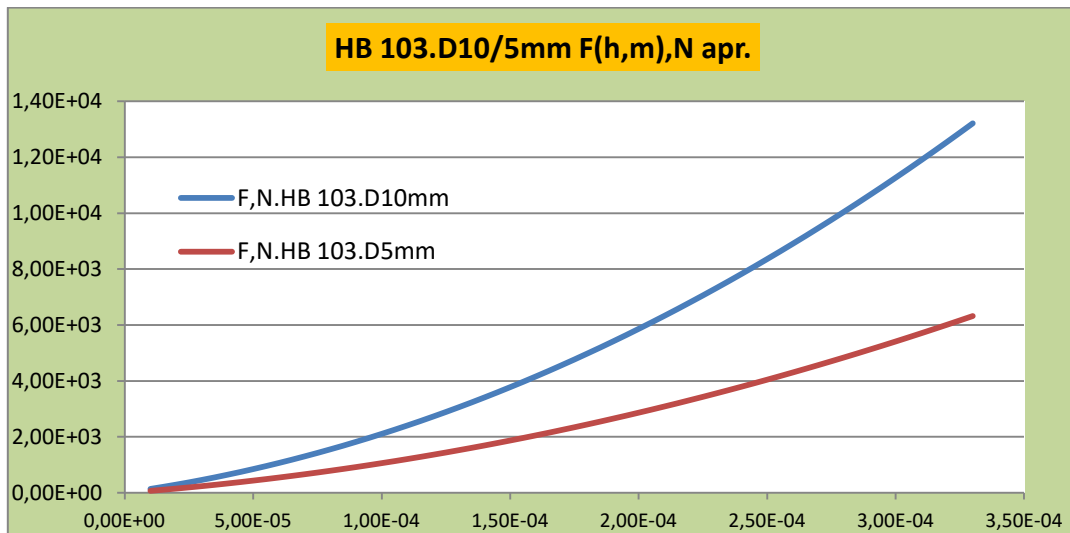
$$PH_o(h) = A_o^1 \cdot h + B_o^1 = A_o^1 h, \quad (16)$$

$$\text{Где, } A_o^1 = \frac{a_o}{2\pi R} = \frac{\alpha R}{2\pi R} = \frac{\alpha}{2\pi}, \quad B_o^1 = \frac{b_o}{2\pi R} = 0$$

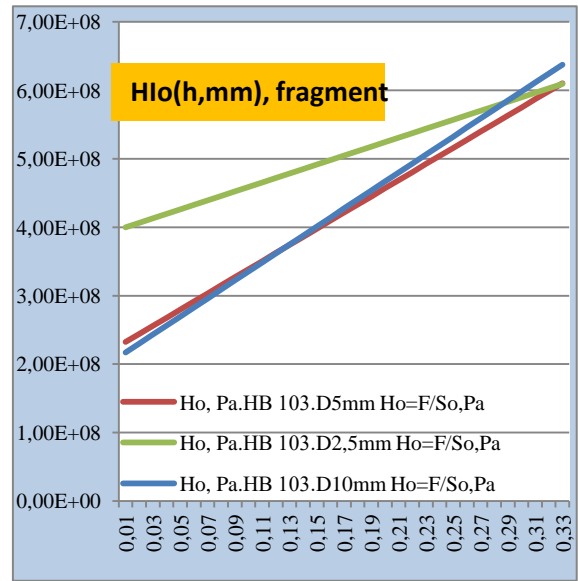
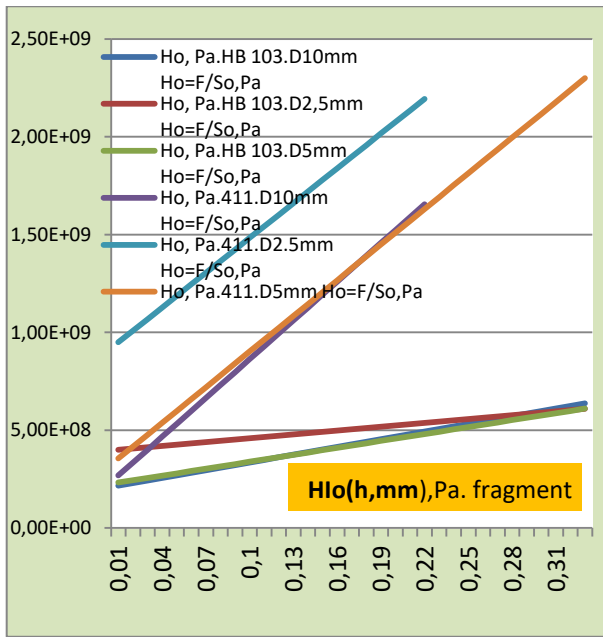
Где,  $\alpha, N/m^3$  - функция физических свойств данного материала, при индентировании сферой. Для заданного постоянного значения  $h$ ,  $\alpha$ , - константа материала и данного метода. Величина  $\alpha$  однозначно связана с функцией  $PH_o(h)$ . Используя (15),(16) получим функцию отношения эмпирической и физической твердости  $\theta(h, D)$  для идеального кинетического ламинарного индентирования сферой различного диаметра:

$$\theta(h, D) = \frac{H_o(h)}{PH_o(h)} = \frac{2}{\delta} \quad (17)$$

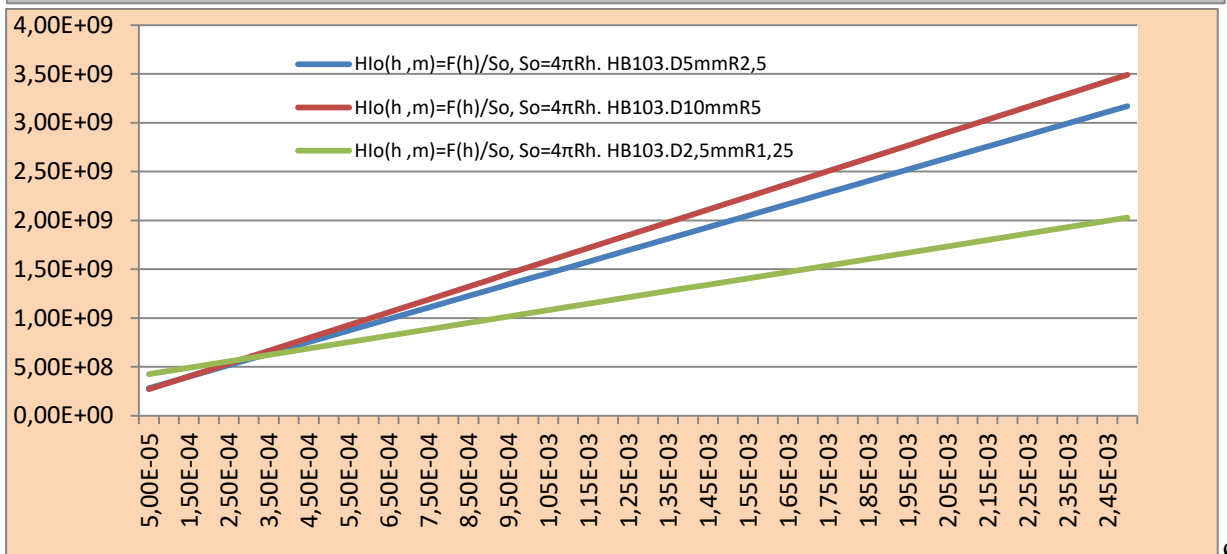
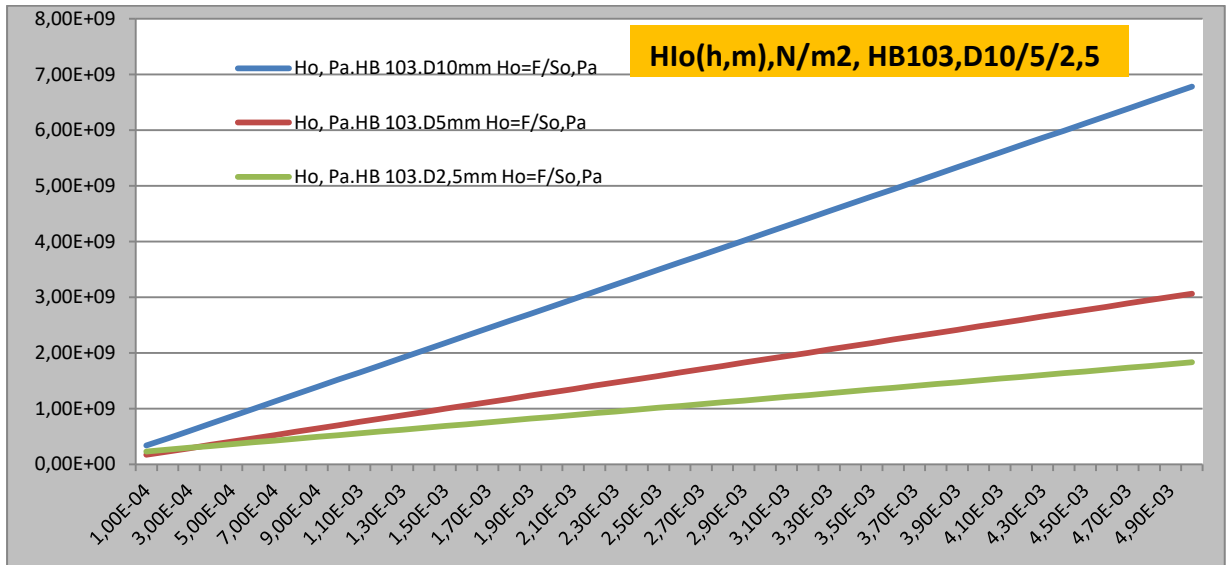
Для случая ламинарного индентирования сферой по методу Бринелля, для не восстановленной твердости можно приближенно принять  $\delta = 2$ . В этом случае мы получим:



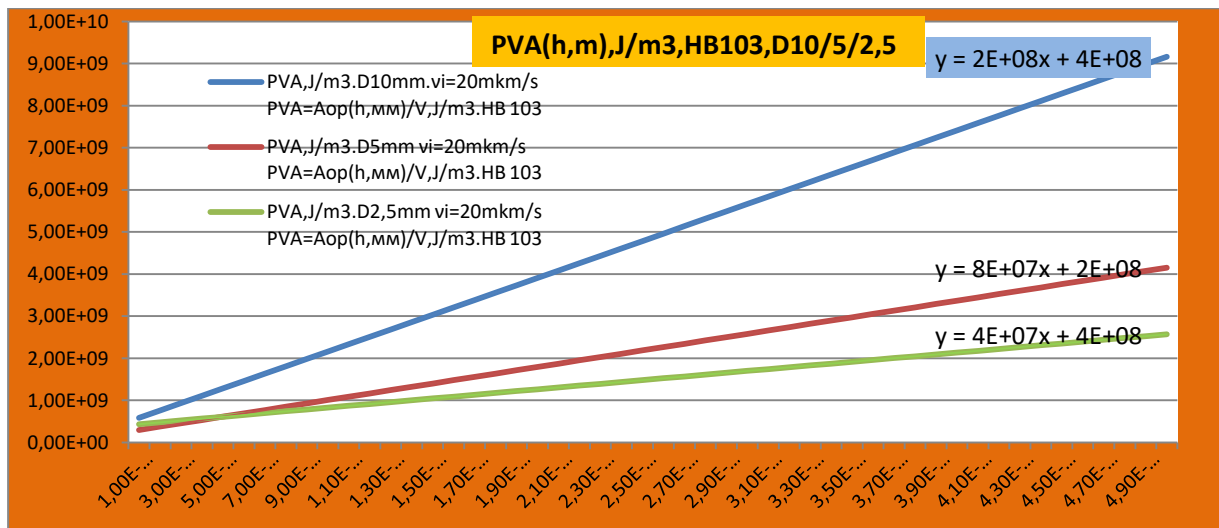
a)



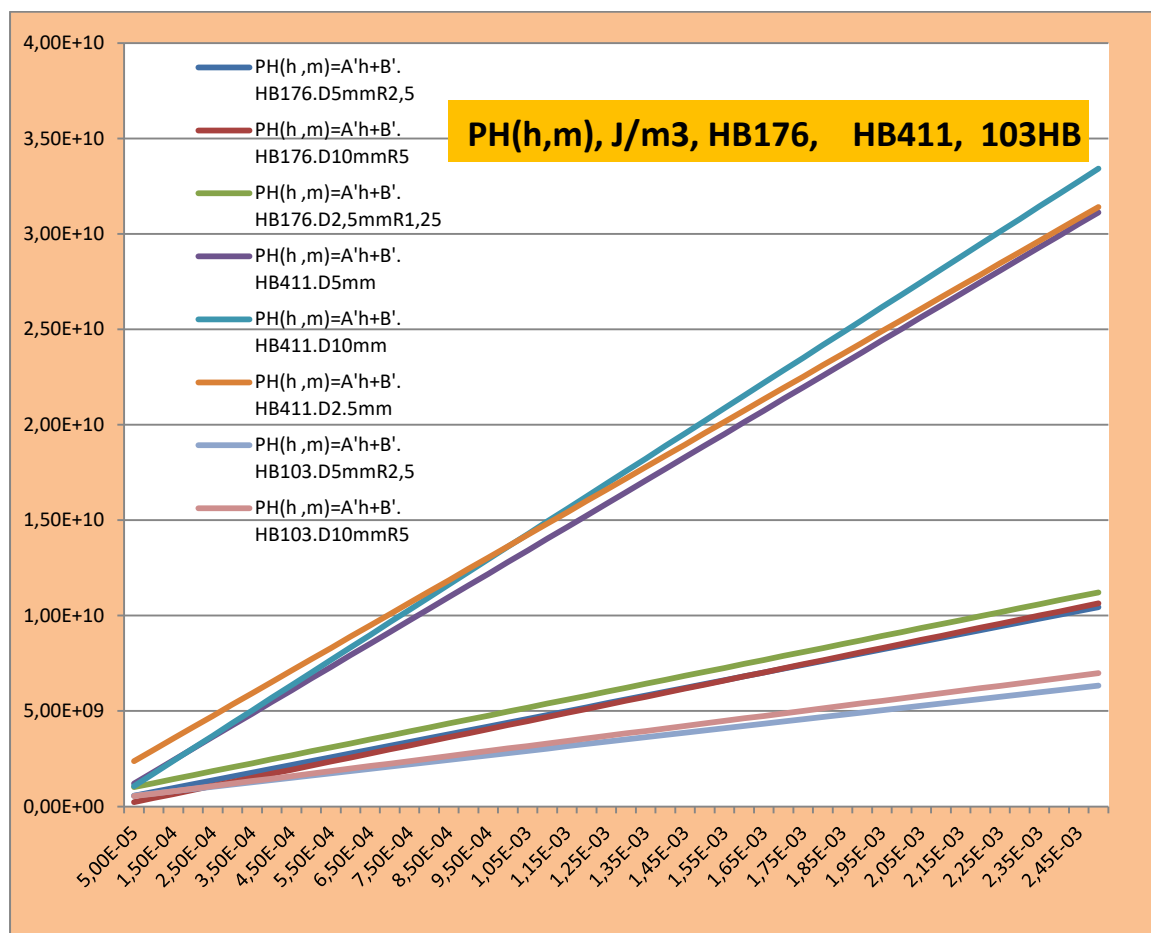
b)



c)



d)



e)

**Рис. 20** а - Зависимость  $F(h, D)$  для разных диаметров; б – эмпирическая твердость индентирования  $PH_0(h)$  для диаметров, D10/5/2,5/, материал меры HB103/411; с - смена механизма индентирования на участке  $h < 0,33\text{mm}$  сфера D2,5mm; д – PVA(h), PH<sub>0</sub>(h), HB103/411, Экспериментальные данные В.И. Мошенок ХНАДУ.

$$PH_0(h) = PH_0(h), \theta = 1 \quad (17.1)$$

На Рис.20 показаны различные функции процесса кинетического индентирования  $F_o(h)$ ,  $HI_o(h)$ ,  $PVA(h)$ ,  $RHO(h)$ , по результатам обработки данных испытания стандартных мер твердости [1].

На Рис.20 экспериментальные кинетические диаграммы индентирования меры HB103 [1], для двух разных диаметров сферы D10/5mm. Легко показать, используя формулы расчета (15), (16), что физическая твердость идеального процесса индентирования («идеальный материал») для любого диаметра определена функцией  $RH_o(h) = A_o^1 h$ , линейной относительно  $h$ . Аналогично выглядит график для не восстановленной твердости поверхностного кинетического индентирования  $HI_o(h)$ . Различие в абсолютных значениях кинетической поверхностной  $HI_o(h)$  и физической  $RH_o(h)$  твердости результат применения в них разных по аналитическому строению приближенных формул условных величин площади и объема активации. Восстановленная площадь контакта  $S$ , контактная поверхность индентора  $S_o$  и активированная площадь формоизменения  $S_a$ , всегда различные, этот факт отражается в параметре  $\delta$ . Площадь контакта  $S_o$ , площадь активированной поверхности  $S_a$  и величина активированного объема  $V_a$  получены разным методом упрощения зависимостей между геометрическими параметрами сферы, конуса, глубины и т.п.

Для перевода значения твердости HB по Бринеллю в физическую твердость, в линейном приближении можно применить формулу:

$$RH_{HB} = \frac{2F_o}{S_a} = \frac{2HB \cdot S_o}{S_a} = \frac{HB\delta}{2}, \quad \frac{N}{m^2} = \frac{J}{m^3}. \quad (18)$$

В общем случае величина  $RH_{HB} = RH_o(h)$  не равна эталону  $RH_{st}$ .

Для вычисления функции дифференциальной физической твердости кинетического индентирования сферой идеального материала  $RH_o(h)$ , по величине эмпирического значения твердости по Бринеллю HB или HBW, необходимо задать величины  $D$ ,  $h_{HB}$ ,  $F$ ,  $S$ ,  $S_o$ , при помощи которых была определена эмпирическая твердость. Задать функции  $S$ ,  $S_a$ ,  $V_a$ , затем найти параметры для функции (16).

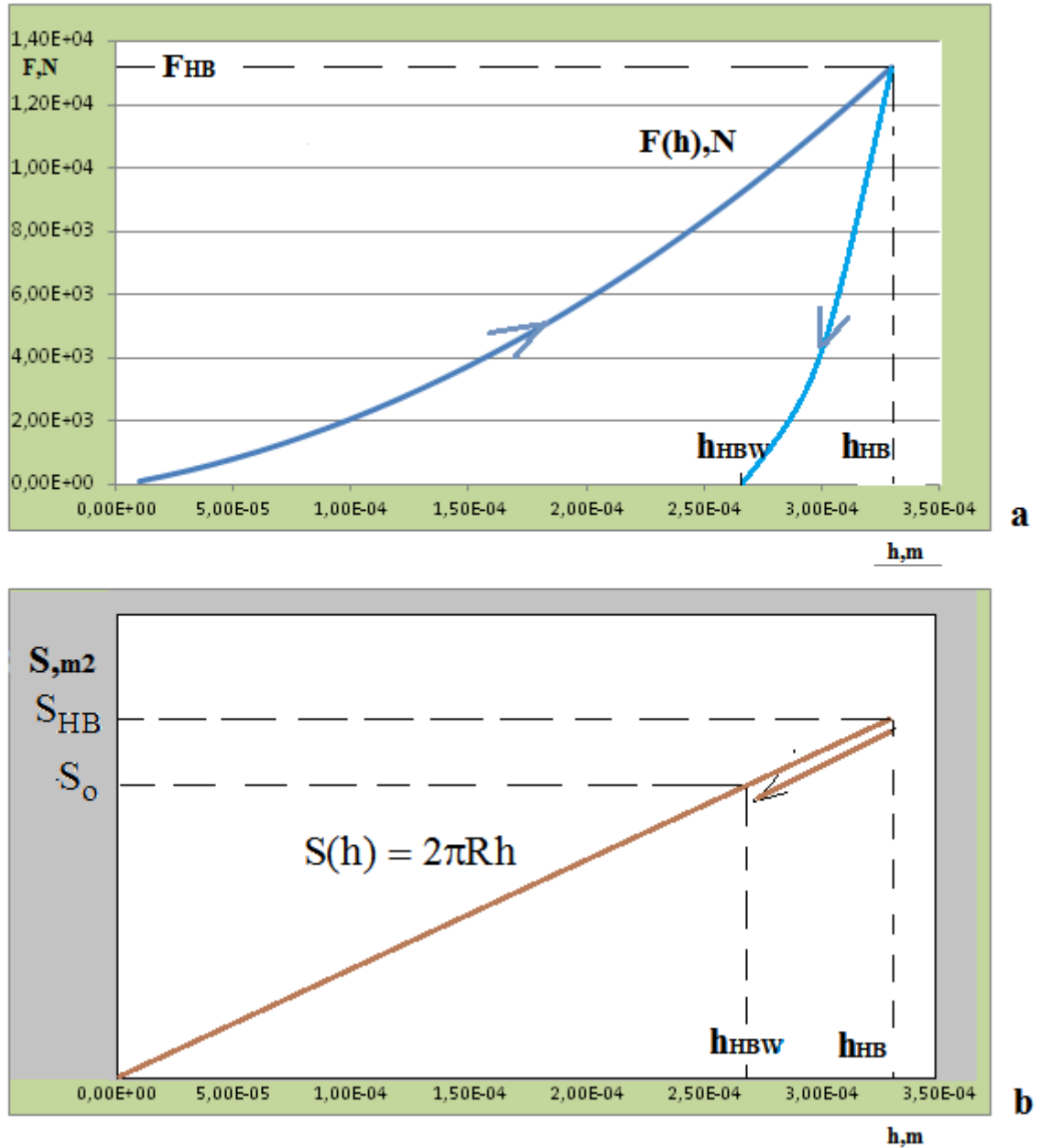
Основные формулы для не восстановленной твердости:

$$h_{HB} = \frac{F_{HB}}{4\pi RHB} \quad (18.1)$$

$$HB = \frac{F_{HB}}{2\pi R h_{HB}} \quad (18.2)$$

Параметр  $a_o$ , полиномы (7.1):  $a_o = \frac{F_{HB}}{h_{HB}^2} \quad (18.3)$

Используя произвольное (не стандартное) значение функции  $RH_{HB}$ , формулы (13) и (14.2) можем найти значение эталонной физической твердости  $RH_{st}$  по величине  $RH_{HB}$ , полученного по эмпирической твердости HB для метода Бринелля. Для этого вычисляем из (13)  $str$  - коэффициент подобия сферического ламинарного индентирования. Для твердости HBW используется дополнительная формула, подобная (18).



**Рис.21.** Основные параметры для расчета чисел твердости HB и HBW на диаграммах  $F(h)$ ,  $S(h)$  индентирования сферой:  $S_0$  - восстановленный отпечаток,  $S_{HB}$  - площадь контакта при усилии  $F_{HB}$

Пример перевода и сравнения эмпирической твердости по Бринеллю HBW и физической эталонной твердости  $RH_{st}$ . Из [2] возьмем пример данных индентирования по

стандарту: HB 5/750/30-350 (автор не указал марку материала). Эти данные означают: твердость 350 единиц по Бринеллю (около 3500Мпа); Диаметр D5mm; Нагрузка приблизительно  $F_{HB} = 7500, N$ ; выдержка 30с.

Вычислим основные параметры, используя (18.3):

$$a_o = 1.63 \cdot 10^{10}, N/m^2 \quad PH(h_{HB}) = 0,7 \cdot 10^9 J/m^3, \quad HI(h_{HB}) = \frac{F_{HB}}{4\pi R h_{HB}} = 0,702 \cdot 10^9 J/m^3$$

Из (18.3), получим зависимость  $h_{HB}$  :

$$h_{HB} = \sqrt{\frac{F_{HB}}{a_o}} \quad (18.4)$$

Таким образом, используя критерий **TR** и параметр подобия  $str$  , далее мы можем определить значение эталона физической твердости материала, по величине эмпирической твердости, полученной для произвольной глубины индентирования, относительно стандартной глубины  $h_{st}$ . Подробно метод в отдельной статье.

### Соотношение эмпирической объемной и физической твердости.

Подробно метод определения объемной твердости рассмотрен в работе [1]. Для анализа физических свойств используем формулы в упрощенном виде предложенные в Часть 1 данной работы, (6.1), (6.2):

$$Hv = F/V, N/m^3$$

$$HIV(h) = F(h)/V(h), N/m^3 \quad (19)$$

Где, **Hv** - механическая эмпирическая объемная твердость, **HIV(h)** - кинетическая объемная твердость. Из (19) подставив функцию (7.1) для идеальной диаграммы F(h):

$$F(h) = a \cdot h^n + b \cdot h, N; \quad b \cdot h = 0, \quad F' = 2ah.$$

После подстановки получим эмпирическую объемную твердость в идеальном процессе:

$$HIV_o(h) = \frac{F_o(h)}{V_o(h)} = \frac{a_o}{\pi R} \quad (19.1)$$

В п.3.1, (7.7) было показано, существует некоторый корневой, основной физико-механический параметр процесса кинетического индентирования, в нем отражена характеристика процесса и метода индентирования. Предварительное название постоянная индентирования материала –  $\alpha_a$ ,  $N/m^2 (J/m^3)$  не зависит от радиуса индентора сферы. Для мер твердости и аппроксимации полиномом второй степени экспериментальных функций F(h) [1] установлено свойство:

Таблица 2

HB	$\alpha_a$ J/m <sup>4</sup> R1.25mm	$\alpha_a$ J/m <sup>4</sup> R2.5mm	$\alpha_a$ J/m <sup>4</sup> R5,0mm
103	$4 \cdot 10^{12}$	$8 \cdot 10^{12}$	$7,4 \cdot 10^{12}$
176	$13 \cdot 10^{12}$	$13 \cdot 10^{12}$	$13 \cdot 10^{12}$
411	$38 \cdot 10^{12}$	$41 \cdot 10^{12}$	$37 \cdot 10^{12}$

$$\alpha_a = \frac{a_1}{R_1} = \frac{a_2}{R_2} = \frac{a_3}{R_3}, N/m^2 (J/m^3), HB = \text{const} \quad (19.2)$$

Где,  $\alpha_a$  корневой параметр структурно физического состояния данного материала и метода его испытаний,  $a_{oi}$  коэффициент аппроксимации нелинейной функции  $F(h)$ ,  $R_i$  - соответствующий радиус у индентора сфера. В данном случае параметр  $\alpha_a$  не зависит от радиуса сферы индентора. Данные расчетов в Таблице 2.

Используя (19.1), (19.2) и формулу  $a_o = \alpha_a \cdot R$ , получим для идеального процесса эмпирическую объемную твердость:

$$HIV_o(h) = \frac{F_o(h)}{V_o(h)} = \frac{a_o h^2}{\pi R h^2} = \frac{\alpha_a \cdot R}{\pi R} = \frac{\alpha_a}{\pi} = \text{const} \quad (19.1)$$

По аналогии с физическим методом (9.1), выполним переход от кинетической эмпирической объемной (19) твердости к эмпирической дифференциальной объемной твердости (19.3), для случая идеального индентирования. Для этого обозначим  $AV_o$  эмпирическую объемную дифференциальную твердость:

$$AV_o = \frac{\partial F(h)}{\partial V(h)} = \frac{F'}{V'} \quad (19.3)$$

Из (19.2), (19.3) получим эмпирическую дифференциальную объемную твердость идеального процесса:

$$AV_o = \frac{F'}{V'} = \frac{a_o}{\pi R} = \frac{\alpha_a R}{\pi R} = \frac{\alpha_a}{\pi} = \text{const} J/m^4 \quad (19.3)$$

Из (16) дифференциальная физическая энергетическая твердость сферического индентирования в идеальном процессе:

$$PH_o(h) = A_o^1 h, \quad \text{Где, } A_o^1 = \frac{a_o}{2\pi R} = \frac{\alpha_a R}{2\pi R} = \frac{\alpha_a}{2\pi},$$

Для эталона твердости из (16) и (14.2) получим окончательно дифференциальную физическую твердость идеального процесса:

$$PH_{st}(h_{st}) = \frac{a_o}{2\pi R} h_{st} = \frac{\alpha_a R}{2\pi R} h_{st} = \frac{\alpha_a}{2\pi} h_{st} = \text{const.} 1, \text{ J / m}^3 \quad (19.4)$$

Из (19.3) и (19.4) видим взаимосвязь и различие дифференциальной эмпирической и физической объемной твердости. Отметим, дифференциальный эмпирический показатель объемной твердости не позволяет объяснить физическую природу размерного эффекта индентирования.

Для перевода значения восстановленной твердости по Бринеллю, обозначается HBW, необходимо определить площадь  $S_{HB} = S_a$ , значение контактной площади при максимальной нагрузке  $F_{HB}$ . Используя для этого формулу (4.6)  $S_{HB} = 4\pi R h_{HB}$ ,  $\delta = 4$ . Из (18.3) найти параметр  $a_o$  и его помощью получим функцию идеальной нагрузки,  $F = a_o h$ , по ней, для значения  $h_{st}$ , определяем эталон твердости и т.п.

Детально этот метод рассмотрим в другой статье.

### **3.5. Второй макрокинетический метод определения физической твердости индентирования пирамидой, конусом.**

Анализ экспериментальных данных и аналитические результаты позволяет предположить, что индентирование пирамидой и конусом (как предельный случай формы пирамиды), представляет совмещенный процесс индентирования - комбинированный поверхностный микро-макро.

На Рис.19 показаны для сравнения характерные функции PVA(h) для индентора пирамида Виккерса и сферы Бринелля. С уменьшением диаметра индентора до некоторого предельного значения процесс имеет форму «ломаной», грубо повторяется форма гиперболы (если шаг измерений показаний большой, Рис 19b). Начальный участок для малых объемов активации (малый диаметр) имеет характерную форму PVA (h) для конуса и пирамиды, ниспадающая ветвь. С ростом диаметра сферы и глубины влияние начального участка высоко энергетически активированного объема убывает.

На Рис.20 показаны характерные кинетические диаграммы физической твердости для разной меры твердости, полученные пирамидой Виккерса. В соответствии с физической концепцией процесса индентирования, диаграмму разделим на два последовательных условных этапа взаимодействия индентора и материала.

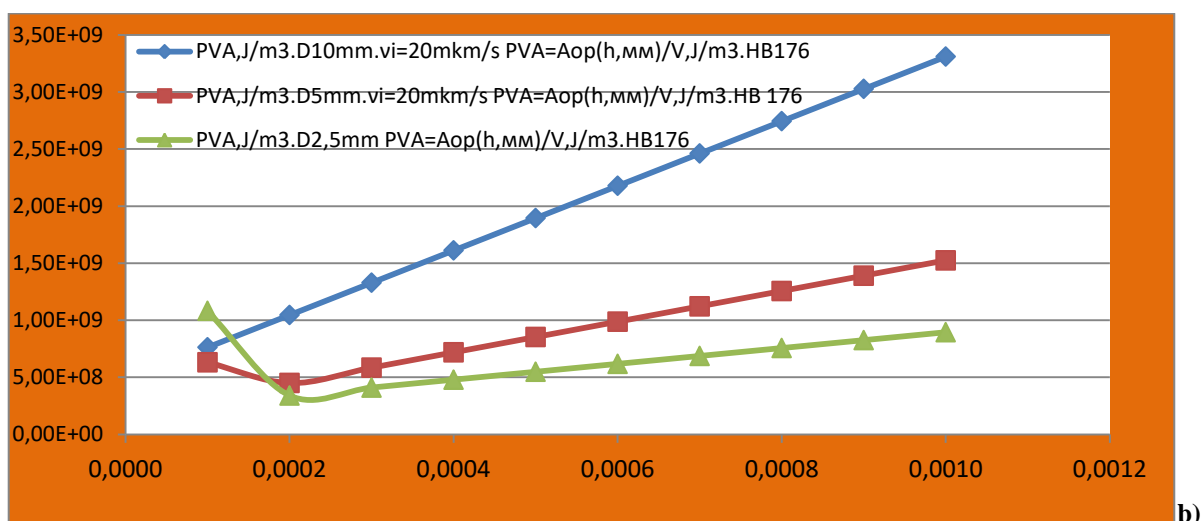
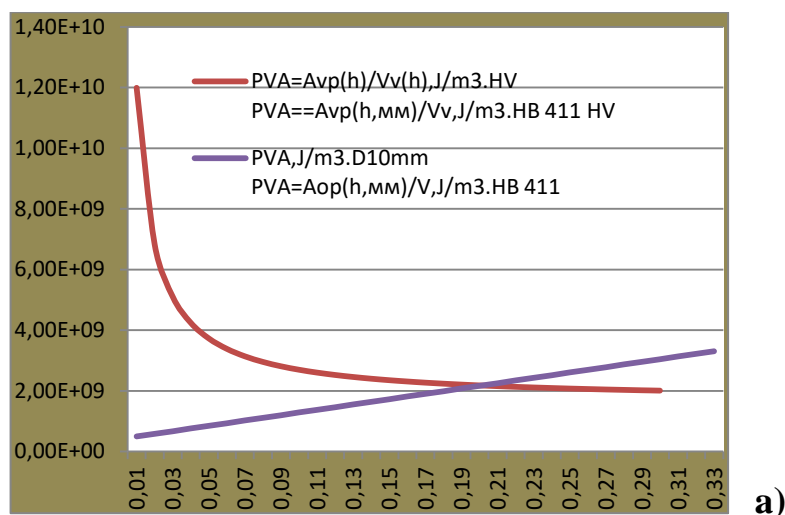
Первый этап развитие nano микро активированного объема. Второй этап формирование устойчивого одновременного процесса формообразования (дополнительный объем) и формоизменения (поверхность). Это обстоятельство обсуждалось в первой части.

1й этап – формирование физического высокоэнергетического состояния активации материала (нелинейная часть) в малом объеме  $V^*r$ . Этап по характеру близок nano или микро индентированию. Однако nanoиндентирование, имеет важные отличительные особенности подготовки поверхности материала, которые влияют на физический механизм микроскопического процесса распределения энергии напряжений, волнами-



квазичастицами, в малом активированном объеме. В макро режимах отсутствует специальная «микроструктурная» тонкая подготовка поверхности материала и индентора. Подробнее об этом, в третьем методе физического индентирования.

2й этап – формоизменение макро объема  $V_a$ , материала в результате проникновения в материал основного тела (сверх объема  $V^*p$ ) индентора. Процесс формоизменения материала происходит в присутствии постоянного источника потока энергии квазичастиц поверхностных волн, возникающих на границе всей поверхности стационарной высоко активированной области  $V^*p$ . Данная область подобна



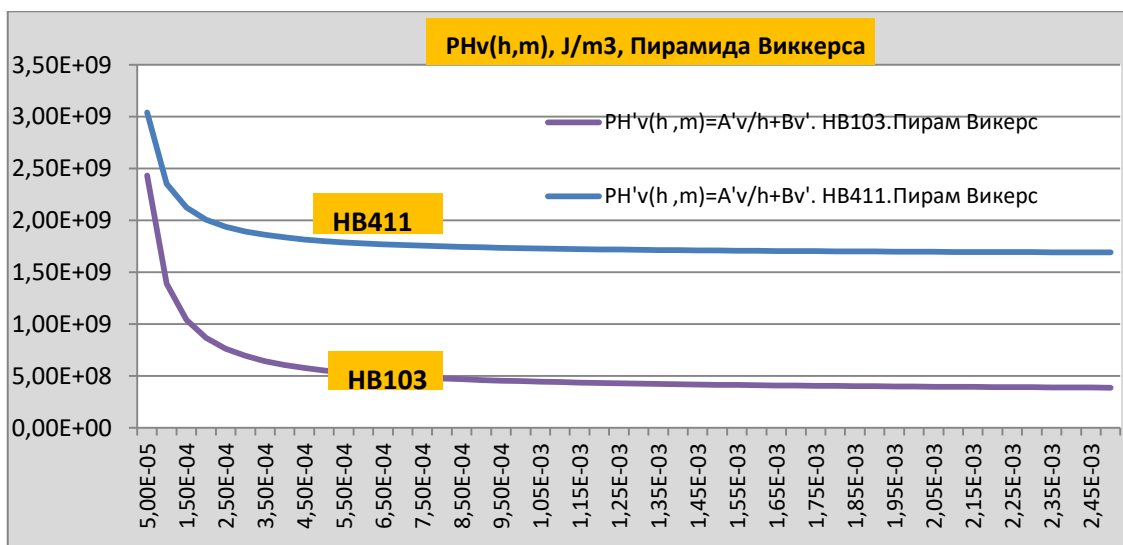
**Рис.19a,b** Характер функции PVA(h) в начальный период процесса релаксации, развития активного физического процесса преобразований материала: а) Пирамида Виккерса HV, сфера D10, HB411, б) сферы Бринелля D10/5/2,5mm, HB176, начальный участок неустойчивости до h=0,2mm, , по данным[1].

концентратору напряжений (вершина конуса, пирамиды), который движется перед вершиной индентора. Эта область высокой плотности энергии поддерживает процесс формирования новой поверхности основной частью пирамиды, конуса. Не возмущенных структурных состояний неповрежденного тела непрерывно вовлекаются в активационный процесс, с меньшими затратами упругой энергии. Присутствует трансляционно-ротационный мощный механизм преобразований свойств тела [10].

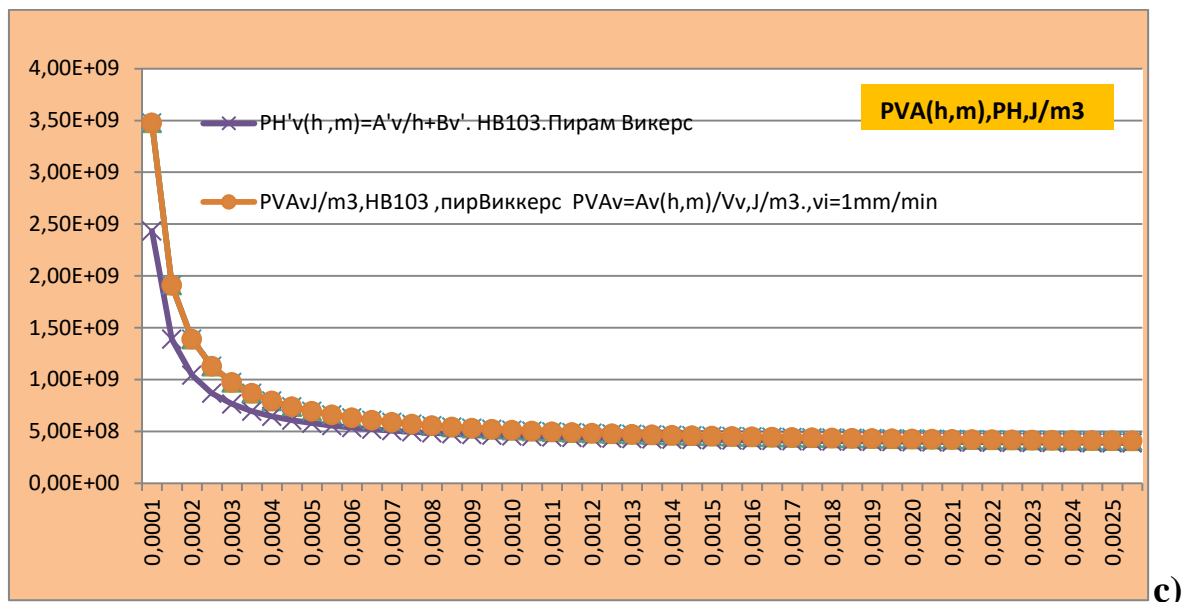
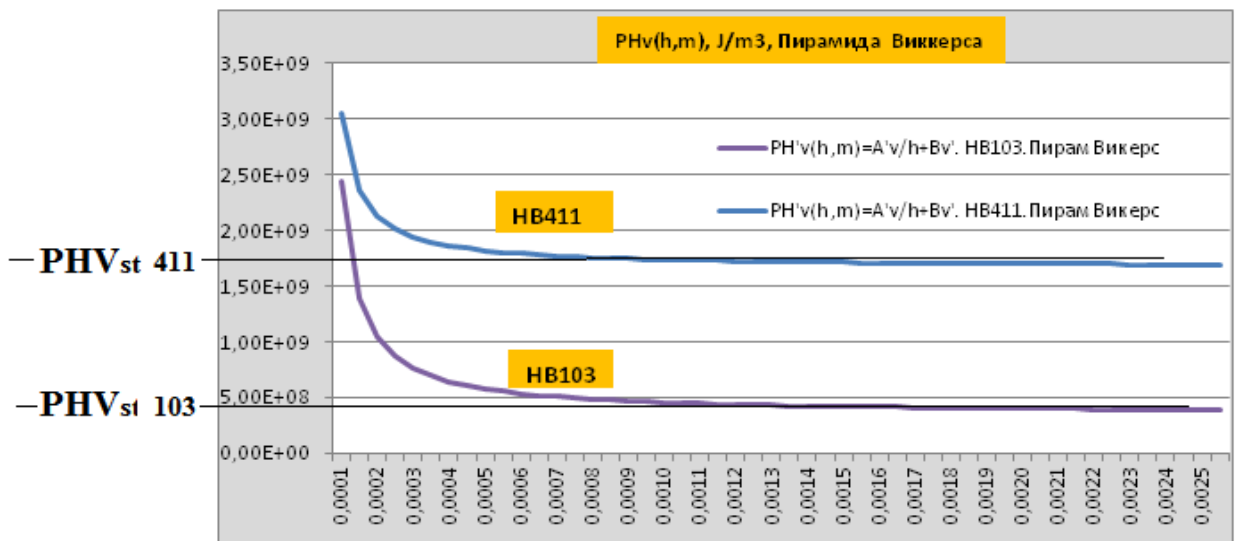
Гипотеза заключается в том, что область высокой активации становится стационарной у вершины концентратора, она движется вместе с основным телом за вершиной индентора. За счет эмпирического, интуитивного (экспериментального) подбора форма пирамиды или конуса и выбора скорости индентирования, практически были созданы особые условия для поддержания в активной области самоуравновешенного процесса. Подобные явления регуляции физических процессов известны в физике сварки (самостоятельная регуляция дуги), в гидромеханике формирование солитона перед движущимся на мелкой воде судном и др.

Роль острой вершины индентора, её влияние на твердость и вид функции нагрузки, в процессе формоизменения материала при индентировании, хорошо проявляется на специальных инструментах, у которых вместо острия сфера (сфероконический) и т.п.

Начиная с некоторого значения глубины  $h^*$ , на исходной интегральной средней характеристике  $PVA(h)$  возникает стабильный, физически ламинарный, приблизительно линейный процесс индентирования. Условно этот стационарный физический этап индентирования пирамидой или конусом можно назвать режим: «индентор – экструдер», по аналогии с технологическим процессом на экструдере.



a)



**Рис.20** Физическая твердость по второму методу, Пирамиды Виккерса: а) Меры твердости HB103/411. б) Эталонная твердость  $PHV_{st}$  асимптотики функции твердости; с) Функция плотности энергии  $PVA(h,m)$  и дифференциальная твердость  $PH(h), J/m^3$ , пирамида Виккерса, выход на горизонтальный участок стабилизации процесса.

Можно показать, что процесс индентирования в 1ом и 2ом методе в общем случае имеет комбинированный механизм образования площади контактной и свободной поверхности.

Подробнее особенности физической модели процесса индентирования 2го объединенного метода (нано и макро) процесса формоизменения и формообразования в отдельной статье.

Предполагая, материал изотропным и однородным, мы получим приближенный критерий сравнения физической твердости материала этих двух разных методов.

**Аналитические зависимости для второго метода индентирования, критерий подобия.**

Для второго метода физического индентирования использована формула (9.3), функция дифференциальной твердости:

$$PHV(h) = A_v^1 \frac{1}{h} + B_v^1, \quad (15)$$

Можно показать, используя (9.3), что для идеального процесса индентирования пирамидой Виккерса:

$$PH_v(h) = A_v^1 \frac{1}{h} + B_v^1 = \frac{a_v}{3\beta}, \quad \text{Где, } A_v^1 = \frac{b_o}{3\beta} = 0, \quad B_v^1 = \frac{a_v}{3\beta}. \quad (15.1)$$

В нашем методе может рассматриваться любая пирамида (с произвольным основанием, например, многоугольник в пределе переходящий в окружность). Влиянием на процесс индентирования угла при вершине, количество граней пирамиды, здесь не рассматривается. Функция  $PHV(h)$  получена на основе зависимостей для нагрузки  $Fv(h)$  в форме полином [1].

По принципу Огара П.М., для второго метода индентирования, сформулируем гипотезу. Если отношение приращения условного активированного объема  $\Delta V$  и приращение работы формоизменения тела  $\Delta A$  постоянная величина, следовательно, приращение работы пропорционально – физическому процессу работы необратимых изменений нового вовлекаемого, активированного индентором объема материала. В этом случае, геометрический и физический объем активированного материала растут одинаково, необратимые процессы внутри материала и на его физической поверхности границы условно подобны механизму индентор – экструдер. Это стационарный процесс взаимосвязанного роста затрат энергии и нового объема пластически деформируемого материала. В данной ситуации активированный материал уже практически не зависит, от геометрии поверхности контакта (пирамида, сфера) в макро режимах. Графики удельного давления или поверхностной твердости для пирамиды сходятся и почти горизонтальны. Можем предположить, что достигнута предельная плотность энергии. В системе материал и индентор данной формы, наступило квазиравновесное состояние формоизменения и формообразования.

Обозначим это предельное значение дифференциальной физической плотности индентирования пирамидой  $PHV_{st}$ ,  $J/m^3$  - стандарт твердости индентирования для второго метода. По существу этой операции мы определим продолжительность процесса индентирования во втором методе. Предположим, что указанное значение предельной глубины индентирования определено для некоторой группы материалов и форм инденторов.

Исходя из этих рассуждений, обозначим:  $h^* = h_{vst}$ . В первом приближении (с запасом глубины), из данных испытания стандартных механических мер твердости НВ [1], для пирамиды Виккерса,  $h_{vst} = 1, \text{mm} = 1 \cdot 10^{-3} \text{m}$ .

По диаграмме физической дифференциальной твердости или полученной аналитически функции (9.3) определяем значение физической твердости материала по второму методу, для глубины  $h_{vst}$  :

$$PHV_{st} = PHV(h_{vst}) \quad (15.1)$$

Сопоставим значения физической дифференциальной стандартной твердости полученной по первому методу  $PH_{st}$  и значение физической твердости  $PHV_{st}$ , полученное вторым методом для выбранного материала:

$$VTR = \frac{PH_{st}}{PHV_{st}} \quad (15.2)$$

Где,  $VTR$  - второй критерий подобия физической твердости, данный параметр устанавливает соотношение между физической твердостью, определяемой по диаграмме индентирования пирамидой Виккерса  $PHV$  и стандартной физической твердостью  $PH_{st}$ . В первом приближении из (15.2) получим значение второго критерия подобия твердости (число сравнения):

$$VTR = 2.3.$$

В общем случае присутствует некоторая функция корреляции  $VTR(PH, ki)$ , где  $PH, ki$  твердость и некоторая константа. Мы получили этот критерий подобия формально, как корреляционный. Основные факторы, влияющие на различие числа физической твердости, при переходе от сферы к пирамиде энергетические, изменение параметра  $X_{sv}(h)$  и вклад энергии активной области вершины индентора.

В частности, отношение условных удельных показателей контактной активированной поверхности сферы и пирамиды Виккерса постоянное при индентировании  $X_{svo}(h)/X_{svv}(h) = 1.39$ , Рис.8с. Этот показатель, предположительно, вносит свой вклад в значение  $VTR$ .

Таким образом, физическая дифференциальная твердость по второму методу индентирования для одного материала (мера твердости), Рис.20а:

$$\text{меры 103НВ} - PHV_{st} = 0.45 \cdot 10^9 \text{ J/m}^3$$

$$\text{меры 411НВ} - PHV_{st} = 1,74 \cdot 10^9 \text{ J/m}^3$$

В [1] отмечается некоторое уменьшение твердости по Виккерсу (около 8%) с ростом глубины индентирования. Отклонение физической твердости, видно из графиков, от значения  $PHV_{st}$  менее существенно. Причину этого явления можно объяснить исключительно методологически, рассмотрим этот факт в отдельной статье.

Следовательно, из (15.2) можем определить стандартную твердость по первому методу, располагая значением физической твердости, полученным по результатам

физического индентирования вторым методом, например имея данные индентирования пирамидой Виккерса:

$$PH_{st} = 2.3 PHV_{st} \quad (15.3)$$

Формулу можно использовать для обратной задачи, определять твердость по второму методу, располагая значением  $PH(h_{st})$ , применяя критерий  $VTR = 2.3$ .

Подробнее объективные физические причины различия чисел физической твердости у одного материала, при разных формах инструмента (угол вершины, число граней пирамиды и т.д.) для макро индентирования, рассмотрим отдельно. Далее необходимо разработать детально и утвердить методику экспериментального определения параметра предельной глубины  $h_{vst}$  с учетом особенностей физико-механических материала.

### **Обсуждение второго метода.**

Из обобщения первого и второго методов определения физической твердости, учитывая форму усеченного конуса индентора в методе Кальверта и Джонсон, целесообразно применить индентор – усеченную пирамиду Виккерса. Размер понижения(усечения) вершины, исходя из характера функций  $PHv(h)$ , Рис.20, целесообразно определить экспериментально, приблизительно в диапазоне  $hs = 0,25-0,4mm$ . Усеченная пирамида, предположительно, позволит исключить в значительной мере начальный нелинейный участок (пик плотности энергии) нано-микро активации индентирования. Функция индентирования в этом случае, предположительно, примет вид устойчивого процесса от начального этапа касания поверхности. В этом случае возможен одноактный корректный физический метод определения твердости, для заданной стандартной глубины перемещения инструмента. Именно этот метод (использован тип усеченного конуса), полностью отвечающий физическому подходу определения твердости, был предложен Кельвертом и Джонсоном [17]. Целесообразно провести новые исследования такого типа инструмента кинетического индентирования.

### **3.6. Физическая универсальная единица кинетической твердости, универсальная шкала.**

#### **Абсолютная, относительная единица и шкала физической дифференциальной твердости индентирования, в основе первый метод.**

В [1, 17] описан принцип индентирования усеченным конусом по методу Кельверта Джонсона, предложенный в 1859г

. [17]. Суть метода – вдавливание усеченного конуса на установленную глубину. Твердость материала в этом случае равна весу груза, необходимого для заданного перемещения. Легко показать, что этот метод аналогичен физическому кинетическому методу измерения твердости. Значение твердости  $PH_{st}$ , с точностью до постоянного множителя, равно твердости по Кальверту Джонсону. Учтя этот исторический факт, в честь авторов метода, предложим ввести универсальную единицу физической твердости:

$$1.0 \text{ CD} = 1 \cdot 10^7 \text{ J/m}^3$$

1.CD - один («кедж», «cadg»), единица физической твердости.

Например, в этом случае, твердость 103НВ соответствует приблизительно 100CD единиц физической твердости. Определим значение в универсальных единицах физической твердости, по данным полученным вторым методом пирамидой Виккерса на мере 103 НВ, в размерности плотности энергии имеем:  $\text{PHV}_{\text{st}} = 0.45 \cdot 10^9 \text{ J/m}^3$

Используя формулу (15.2), значение критерия подобия  $\text{VTR} = 2.3$ , получим для меры 103 НВ:

$$\text{PH}_{\text{st}} = \text{VTR} \cdot \text{PHV}_{\text{st}} = 2,3 \cdot 0.45 \cdot 10^9 = 1,035 \cdot 10^9 \text{ J/m}^3$$

Переведем эту величину в универсальные единицы твердости - приблизительно 100CD. Таким образом, твердость основных конструкционных материалов находится в диапазоне значений 1-1000CD, не зависимо от типа индентра.

Логарифмическая, безразмерная версия физической шкалы твердости, возможно, представляет более удобный способ сравнения твердости разных материалов.

Введем обозначение логарифмических единиц физической твердости

:

$$\text{Lg}(\text{PH}_{\text{st}}) = \text{CDL}.$$

Следовательно:  $1.0\text{CD} = 0.\text{CDL}$ ,  $10000\text{CD} = 4\text{CDL}$ .

### 3.7. Локальная физическая твердость, метод П.М. Огара.

Это частный случай дифференциального метода определения плотности энергии индентирования. Вариант объемного энергетического подхода исследования твердости материалов предложен в [9]. Работа коллектива под руководством П.М Огара, посвященна определению механических свойств материалов по их свойствам твердости. Авторы предложили зависимость (8):

$$\text{HE} (h) = \frac{\Delta A (h)}{\Delta V (h)}, \text{J/m}^3 \quad (8)$$

По их мнению, число HE, позволяет характеризовать твердость материала с достаточной для инженерных расчетов точностью зависимостью (8). Если функции  $A(h)$ ,  $J$ ;  $V(h)$ ,  $\text{m}^3$  на некотором участке можно аппроксимировать прямыми линиями, то для этого интервала HE будет постоянной величиной, которая может характеризовать твердость. Далее, для краткости, метод измерения предложенный в работе [9], называем локальным индентированием.

В обосновании критерия физической твердости, мы так же использовали предположение, что с некоторого значения глубины  $h^*$  кинетического индентирования,

изменение (приращение) геометрических величин условного активированного объема  $\Delta V(h)$  и площади условного контакта  $\Delta S(h)$ , можно считать приблизительно равными или пропорциональными соответствующим изменениям физических параметров индентирования  $V_p$  и  $S_p$ :

$$\Delta(h) \approx k \cdot \Delta V_p(h), k = \text{const нормирования. } \Delta S(h) \approx \Delta S_p(h). \quad (8.1)$$

Можно показать, что параметр HE (h) равен значению функции PVA(h\*), в окрестности некоторой точки h\* диаграммы плотности энергии, если в ней выполнено условие линейности двух рассмотренных функций в (8.1). В результате, получим:

$$HE(h^*) = PVA(h^*), J/m^3$$

Следовательно, функция (8), исходя из анализа дифференциальной плотности энергии и анализ аналитических свойств экспериментальных функций PVA(h), представляет *частный случай* общего подхода определения дифференциальной энергетической твердости.

При исследовании реальных конструкционных материалов, измерениях на самой конструкции, кинетическая диаграмма может иметь форму кривой с перегибом и др. Следовательно, дифференциальная характеристика интеграла плотности энергии индентирования, как частная производная по объему, может иметь ложный характер. В этом случае, при перемещении индентора, локальная функция PVA(h) искажает картину, возникают участки неоднозначных свойств и т.п. Это может происходить при индентировании многослойных тонких покрытий, композитов, нестабильных, анизотропных и неоднородных материалов и др. Локальный метод предоставляет возможность определять твердость на отдельных, локальных участках формирования функции усилия F(h) кинетического индентирования. В этом случае объективно только сопоставление абсолютных значений (получим условный относительный показатель, не нормированной) параметров условной твердости исследуемого материала, покрытия и др. Само абсолютное значение локальной физической твердости может быть не корректным и неоднозначным, относительно первого стандартного метода. Примем специальное обозначение PHL для числа физической твердости по методу индентирования П.М. Огара [9]:

$$PHL = HE = \frac{\Delta A}{\Delta V} = f_{PHL}(h_1 < h^* < h_2), J/m^3 \quad (8.2)$$

Где, PHL, J/m<sup>3</sup> - локальная дифференциальная твердость по методу [9].

Можно рассматривать этот метод как инженерный, технологический. Для сравнения сопоставления (comparison, identification, to make a comparison), при этом материал может быть нестабильным неоднородным, композитным и проч., функция нагрузки криволинейная. Метод Огара позволяет исследовать отдельные фрагментные качества структуры и др. не требуя стандарта и др. В этом случае мы исследуем не интегральные свойства или механическую прочность и твердость материала,



сопоставляем локальные данные индентирования материала. Нет необходимости, строить или обрабатывать всю кривую индентирования, достаточно анализировать процесс на выбранном (доступном) участке диаграммы. Очевидно, что в этом случае остается открытым главный вопрос – физическое понятие твердости, мера твердости, критерии сравнения разных методов (инструментов) и т.п. Этот метод можно применять для любого типа индентора и режима, для *сравнительных* оценок влияния различных факторов на структурно-физические свойства материала, поверхности и др., только в рамках выбранного метода, режима. Для более широкого анализа результатов локального индентирования необходим перевод результатов локального метода в физическую меру твердости и т.п.