

Макротвердость кинетического индентирования материала, функция, число, универсальная физическая единица твердости.

Shtyrov Nikolay

Nikolayev, Ukraine, +380675102044, E-mail: nasht@ukr.net

Abstract:

Три направления развития инструментального индентирования. Физический энергетический анализ силовой диаграммы индентирования по ISO 14577. Физическая модель процесса кинетического макроиндентирования материала, критерий макротвердости, термомеханический потенциал, функция состояния. Значение эталона кинетической физической твердости материала. Связь эмпирической и физической макротвердости материала. Причина размерного эффекта в эмпирических методах макроиндентирования. Физический эталон макротвердости материала при кинетическом индентировании сферой. Особенности метода измерения твердости Кальверта – Джонсона. Универсальная физическая единица макротвердости кинетического индентирования.

Key words: обзор, физическая теория кинетического индентирования, метод определения, функция, число, универсальная единица физической макротвердости материала, соотношение стандартной и физической макротвердости.

План

Part 1. Физическая макротвердость кинетического индентирования материала. Функция и универсальная единица измерения.

- 1. Три направления развития индентирования.*
 - 1.1 Обзор, вывод.*
 - 1.2 Физическая концепция твердости и прочности материала.*
- 2. Физический критерий твердости материала.*
 - 2.1 Схема процесса макро индентирования.*
 - 2.2 Физическая модель термомеханической системы.*
 - 2.3 Физический термомеханический потенциал, функция состояния макроскопической системы активированного объема материала.*
 - 2.4 Экспериментальные свойства потенциала удельной обобщенной мощности индентирования. Физическая величина и эталон макротвердости. Вывод.*

Part 2. Физические свойства функции и числа эмпирической макротвердости материала. Универсальная физическая единица измерения макро твердости.

- 1. Функция и число эмпирической макротвердости, физические свойства.*
- 2. Физические свойства функции и числа эмпирической макротвердости материала. Критерий подобия.*
- 3. Эталон макротвердости индентирования сферой.*
- 4. Физические особенности процесса измерения твердости методом Кальверта – Джонсона.*
- 5. Обсуждение результатов.*
- 6. Размерный эффект при измерении макротвердости.*

7. *Универсальная физическая единица макротвердости.*

8. *Выводы.*

Part 1. Физическая макротвердость кинетического индентирования материала. Функция и универсальная единица измерения.

Три направления развития индентирования. Физическая концепция твердости и прочности материала. Обзор, вывод.

Современное индентирование это распространенные многогранные оперативные неразрушающие методы оценки твердости, нано-микро структурных и физико-механических свойств материалов и тонких покрытий. Эти методы можно условно разделить на три исторически сформировавшихся направления развития:

- 1- Одноактное макро поверхностное эмпирическое индентирование.
- 2- Макро instrumented кинетическое indentation.
- 3- Нано-микро кинетическое indentation.

Кратко характеризуем особенности и недостатки каждого направления, опираясь на физические принципы анализа процесса индентирования, сделаем выводы.

Одноактное эмпирическое индентирование макроповерхностей.

Первоначально понятие твердости это механическая характеристика материала, тесно связанная с понятием прочности. Первый, физически правильный метод измерения твердости, согласно исследованиям [1], был создан Калвертом-Джонсоном (1859 г.) [2]. Авторы впервые применили в испытаниях индентор с усеченным конусом. Создана единая шкала твердости материалов от свинца до чугуна и др. Теоретическое физическое определение твердости по методу Калверта-Джонсона (далее МКЖ) не проводилось. Анализ этого метода [1] показал, что он составляет ключевой физический принцип макроинструментального индентирования. Более сорока лет этот метод остается неизменным. В течение следующих ста лет появились новые методы индентирования. Они периодически меняли методы обработки данных механического акта, эмпирические методы обработки конечных параметров акта индентирования. Эти изменения незаметно заслонили корневой физический принцип опосредованного сравнения разной удельной энергии, мощности физического процесса индентирования материалов различной твердости. Изменения затрагивали только методологические и технологические способы измерений и обработки внешних, эмпирических данных. При этом поддерживалась исходная безразмерная сравнительная шкала твердости **МСЈ**, расширился перечень материалов, диапазон и метод анализа процесса индентирования. В тезах современной общепринятой «механической» трактовки понятия твердость материала [3] присутствуют противоречия. Инженерные находки в новых методах определения безразмерного числа твердости заслонили корневой физический принцип сравнения разных физико-механических свойств процесса индентирования. На практике закрепилось следующее каноническое определение (в сокращении). **Твердость** - способность материала сопротивляться изменению формы и образованию новой поверхности при вдавливании в него инструмента из более твердого материала [3]. Далее используем это определение как признанную формулировку понятия **эмпирическая твердость - ЕН (Empirical Hardness)**. Под этим обозначением подразумеваем методы

одноактного макро поверхностного эмпирического индентирования. Инструментальное индентирование рассматривается отдельно.

Методы **ЕН** широко и успешно применяются в промышленных и научных исследованиях свойства твердости сплавов и др. материалов. Рассмотрим три известных метода: Бринелля (индентор сфера), Роквелла (сфера и сфера-конус), Виккерса (пирамида) и др. Подробный обзор методов можно найти в [3]. Обобщая выводы монографии профессора В.И. Моценко специалиста по индентированию и собственные исследования [1], обсудим характерные недостатки эмпирических методов одноактного и кинетического индентирования.

Метод Бринелля. Расчет числа твердости, в рамках ISO 14577-1:2002 [4], вызывает затруднения в выборе правильной шкалы, в которой установлена эмпирическая связь усилия и твердости. Отсутствует обоснованный ясный критерий выбора. Шкала для измерений (таблица) получена эмпирически, формируется опытным путем, зависит от усилия и формы индентора и др. В методе существует более тридцати шкал для измерения твердости. Таким образом, число твердости зависит от усилия, но эта зависимость, в общем случае не имеет системного характера. Американский стандарт, для этого метода индентирования, предлагает использовать дополнительные шкалы, тем самым дополнительно усложняет метод. Выбор нужной шкалы представляет сложную и неоднозначную и часто противоречивую систему. Этот метод, или подобный ему, регистрирует не сопротивление металла внедрению, а конечный результат процесса. Этот метод противоречит исходному определению **ЕН**. Метод Бринелля устойчиво работает в области больших нагрузок. Для микро и нано нагрузок его применение проблематично, требует дополнительного изучения и совершенствования [3].

Метод Роквелла широко применяется на практике. Фактически метод не соответствует сути приведенного выше, определения **ЕН** твердости. Число твердости не соответствует числам других методов, оно лишено всяческого физического смысла [3]. Твердость по Виккерсу регламентируют четыре стандарта, в которых присутствует существенное различие в выборе необходимого усилия при измерениях, сложная система сопоставления и обозначения результатов. Особенно запутанная ситуация проявилась в микро диапазоне, здесь наблюдается зависимость твердости от нагрузки (эффект - ISE) [3]. Метод имеет некоторые недостатки свойственные **ЕН** индентированию [3]. Анализ и обзор одноактных и комбинированных макро методов empirical hardness можно найти в [1,3].

Макро instrumented indentation (кинетическое индентирование).

Методы instrumented indentation возникли около 60-70 годов. Кинетическое, instrumented indentation высоко информативный метод изучения разных свойств материала и физического процесса, в сравнении одноактным **ЕН** методом измерения твердости. Стандарт ISO 14577-1:2002 [4] определяет: работу процесса индентирования, модуль упругости EIT, ползучесть при индентировании CIT, релаксацию при индентировании RIT, пластическую и упругую составляющие работы индентирования. В кинетическом методе по стандарту ISO 14577 число твердости материала НМ определяется по Мартенсу. НМ твердость зависит от нагрузки на индентор, такое свойство числа твердости получило название indentation size effect. Стандарт предусматривает построение функции усилия на индентор F(h), пример Рис.1b. Выбор величины

максимального усилия F , при измерении поверхностной или объемной твердости [3], носит так же неоднозначный, эмпирический характер [1,3]. На функцию $F(h)$ и число твердости влияет форма индентора. Однако строгой связи нет. Для сферического индентора с увеличением нагрузки твердость увеличивается — reverse indentation size effect; для индентора в виде пирамиды Виккерса или Берковича с увеличением нагрузки твердость уменьшается — прямой или просто размерный эффект (indentation size effect); для сфероконического индентора возникают смешанные эффекты. [1,3]. Преимуществом инструментального метода индентирования является отсутствие необходимости измерения размеров отпечатка. Энергетические и др. показатели процесса индентирования в стандарте ISO 14577, существенно расширили объем и глубину контролируемой информации. Но в стандарте изначально отсутствует обоснованный физический критерий твердости. Следовательно, корректный метод сравнения разных эмпирических методик, шкал, чисел твердости не может быть реализован. Контактное давление или условное напряжение, которое, явно или скрыто присутствует в любом эмпирическом показателе твердости, не является однозначной физической характеристикой состояния рассматриваемой термомеханической системы инструмент - материал – машина [1]. В стандартных алгоритмах расчета числа твердости проявляются недостатки канонического определения **ЕН**. Сохраняется «механическая», эмпирическая формулировка понятия твердости. Нет связи кинетических физических параметров процесса индентирования с энергетическими характеристиками внутреннего процесса преобразования материала, нет объяснения причины вредного размерного эффекта и др. Понятие **ЕН** находится в рамках теории континуума, теории упругости, механики деформированного твердого тела. Необратимые изменения твердого тела при индентировании рассматривают феноменологически и эмпирически. В ISO 14577 при **определении числа твердости материала** доминируют эмпирические принципы. В стандартных методах нет физического критерия твердости как процесса. Он нужен нам для оценки и сравнения удельной энергии внутреннего необратимого структурно-энергетического кинетического процессов в разных по твердости материалах. Стандартом предусмотрена оценка *абсолютной величины* энергии индентирования. С точки зрения физической теории этого недостаточно для объективной характеристики состояния *макроскопической термомеханической системы*, в разных по свойствам твердости материалах при *instrumented indentation*.

Нано-микро instrumented indentation.

Применение новых технологий нано материалов и покрытий, создание высокоточных приборов и механизмов формирует самостоятельное направление нано и микро instrumented indentation. Это направление в большей степени ориентировано на исследования свойства и строения тонкой структуры материалов, особенности верхнего нано-микро слоя материала или его покрытия. В материаловедении, технологиях нано-микро конструирования материалов и тонких покрытий микротвердость предоставляет информацию свойствах фаз и структурных составляющих [1,5,6]. Анализ некоторых научных результатов развития этого направления instrumented indentation можно найти в работах [1,3,5, 6,7].

Сравнительный анализ значений числа твердости материала в нано диапазоне и макро диапазоне показывает, что **физическая** энергетическая нанотвердость более чем в десятки раз больше чем эмпирическая макротвердость [1]. В нано индентировании этот

экспериментальный факт обходят формальным методологическим способом подбора «уточненной» площади контакта, оправдывают «размерным эффектом» и др. Применение понятия геометрической поверхности контакта индентора и материала в нано диапазоне, как характеристики внутренних процессов грубое, не корректное [1]. В активном объеме контакта материала и индентора нано взаимодействие тел происходит на высоком физическом энергетическом уровне, удельная мощность процессов и механизм необратимых изменений в нано активированном объеме характеризуется другими уравнениями и зависимостями [1, 5]

В стандарте ISO 14577 применяют элементы физического анализа силовой диаграммы кинетического индентирования. В частности, в методике Оливера и Фарра, для корректировки значения числа твердости использован параметр контактная жесткость. Стандарт не содержит физического обоснования формулы этого параметра, это феноменологический подход. Проведенные исследования показали [1], что этот параметр имеет физическую основу, тем самым подтверждает некоторые наши теоретические результаты.

Анализ экспериментальных удельных энергетических параметров преобразований материала [1,3,5,6], в диапазоне нано-микро индентирования показал, что этот процесс имеет удельную мощность (J/m³) на 1-2 порядка выше, чем в макро диапазоне. С ростом усилия и глубины СИ острым индентором (пирамида, конус и др.) формируется комбинированный кинетический процесс. Действуют два физических механизма преобразования тонкой структуры и объема материала с различной удельной мощностью высвобождения и трансляции энергии. Для формирования критерия и теории нано физической твердости первоначально установим понятие макро **физическая твердость процесса instrumented indentation**. Эта теоретическая база позволит нам выполнить физический анализ сложных нано-микро-макро кинетических процессов [1].

Вывод.

В настоящее время действует ряд стандартов и методов, шкал которые не имеют обоснованной систематизации, нет единого способа корректного сравнения разных измерений твердости. Отсутствует физически теоретически обоснованное определение твердость. В целом существующий подход мы определим как **эмпирическая твердость материала ЕН (Empirical Hardness)**. Значения твердости, полученные методами ЕН, не имеет физического содержания и корректно не сопоставимы. Подобная ситуация относится к методам царапания [3,5]. В ЕН определяют разными методами и инструментами корреляционные параметры, которые исторически называли - число твердости материала.

Физический фундамент определения числа твердости был использован в методе Кальверта Джонсона (1858г, далее МСЖ). На его основе была получена первая обобщенная энергетическая шкала систематизированных значений твердости разных материалов, она построена на физических принципах. В методе был заложен строгий принцип подобия испытания материалов разной твердости. После сорока лет применения МСЖ был искажен различными дополнениями. Сохранялась (частично) первоначальная шкала корректного сравнения твердости. В последствие, утвердился эмпирический одноактный метод измерения числа твердости. Для решения прикладных задач материаловедения, металлургии, механики и др. методы ЕН приемлемы.

Систематизация обобщение и развитие методов **ЕН** без физического обоснования не имеет перспективы. Построение теории кинетического индентирования и обоснование физической единицы твердости, создание базы единого стандарта измерений и корректного сравнения чисел твердости из разных методов и диапазонов невозможно в рамках **ЕН**. Для развития и совершенствования методов индентирования необходимо создать основу - физическую теорию твердости.

Физическая концепция твердости и прочности материала.

Твердость и прочность, во многом близкие физико-механические характеристики материала. Оба понятия неразрывно связаны с большими пластическими деформациями и высокой плотностью энергии материала в процессе испытания на предельные характеристики прочности. В стандарте ISO/TR 29381:2008 предложен метод оценки параметра прочности на растяжение. Пример эмпирической формулы, связывающей твердость по Бринеллю и предел прочности: $HВ = 3\sigma_b$, где σ_b - предел прочности материала на растяжение. Простые формулы применяют инженеры металлургии, металловеды, технологи, специалисты прочности и др.

Появление новых конструкционных материалов, технологий нанесения тонких покрытий, методов упрочнения поверхности твердых тел, инициировало развитие новых методов, инструментов и оборудования для индентирования. Методы механических испытаний материала на макро образцах трудоемкие, затратные и часто недоступные. Установление физической и аналитической связи твердости и механической прочности материала актуальная инженерная и научная задача [3,5,7].

Накопленные экспериментальные данные свидетельствуют, что при индентировании и механических испытаниях действуют во многом общие физические механизмы и процессы преобразования разной энергии рассеянной в тонкой структуре макро объема активированного материала. Финальный результат эмпирических измерений выражен в значении некоторого внешнего (эмпирического) параметра процесса - число твердости или значение предела прочности (текучести, усталости и др.). Физическая теория твердости рассматривает параметры и *свойства кинетического процесса испытаний* (вдавливание, растяжение и др.). Для характеристики процесса кинетического индентирования материала используем: скорость роста плотности энергии активированного объема (удельная обобщенная мощность индентирования), скорость роста усилия, функция формоизменения или удельная образованная поверхность и др. Это кинетические характеристики процесса взаимодействия материала и инструмента в составе всей системы.

Концепция физической кинетической твердости.

Теория физической твердости использует принципы физической структурно-энергетической кинетической теории прочности разрушения и деформирования твердых тел [1,8,9,10]. Физическая прочность – способность материала сохранять в течение определенного периода времени, теряя с определенной скоростью и мощностью свои первоначальные свойства, параметры при реологическом действии разных физико-механических факторов или нагрузок: температура, напряжения, время, радиация, водородный потенциал и т.д. Физическая кинетическая твердость, в этом контексте - частный случай физического процесса формоизменения и необратимых структурных преобразований деформированного твердого тела под воздействием движущегося

индентора. Экспериментально-аналитический физический метод анализа данных кинетического индентирования состоит в построении физической функции твердости и определении числа (значения) **физической твердости** материала. Это объективные индивидуальные интегральные характеристики **процесса** происходящего в деформируемом, индентируемом материале в составе определенной термомеханической системы или определенных физико-механических условиях испытаний. Кинетический метод indentation соединяет общие физические методы теории прочности и долговечности материалов, это частный случай физической механики обратимых и необратимых процессов происходящих в деформированном твердом теле как термомеханической макроскопической статистической системе. Эмпирические характеристики процесса индентирования сила, перемещение, условная площадь индентирования и др. Физическая кинетическая теория твердости использует так же дополнительные характеристики. Условный и физический активированный объем (m^3); плотность энергии индентирования (J/m^3); удельная обобщенная мощность индентирования (J/m^3); молярная плотность энергии активированного объема (J/mol); обобщенная скорость роста усилия индентирования (N/m); функция и параметр формоизменения объема ($1/m$) и др.

В работе [11] для расчета состояния прочности, долговечности и предельных параметров состояния материала используются физические уравнения и универсальные физические молярные кинетические параметры прочности конструкционного материала. Физические молярные параметры прочности материала аналитически связаны с величиной его физической твердости кинетического индентирования. Определение универсальных физических кинетических параметров материала ранее было сложной экспериментально-аналитической задачей. В настоящее время мной разработан новый упрощенный метод определения физических кинетических параметров прочности и долговечности конструкционных материалов [1]. Он основан на комплексном физическом анализе стандартных экспериментальных диаграмм кинетического макро и нано индентирования материала. Методологически физическая теория твердости материалов разделена на три вида анализа кинетического (инструментального) индентирования: макро, нано-микро и комбинированный метод. Далее изложен первый этап - физический метода анализа данных макро индентирования. Обоснованы главные понятия, активированный объем, плотность и мощность энергии индентирования, функция и число физической твердости кинетического индентирования материала и др. Установлена связь значений безразмерного числа эмпирической (стандартной) твердости и физической твердости. Показана физическая причина размерного эффекта в эмпирических методах определения твердости и др. Разработана теоретическая основа для корректного физического метода сравнения числа макротвердости материала, полученного разным инструментом, стандартом или методом. Полученные результаты представляют основу для дальнейшей разработки методов анализа данных и физической теории нано-микро кинетического индентирования.

Физический критерий твердости материала.

Схема процесса макро индентирования.

Для разработки физической модели процесса макро индентирования первоначально построим схему механического процесса на примере двух макро поверхностных методов, индентирование сферой Бринелля и пирамидой Виккерса (острый индентор) Рис. 1а,б.

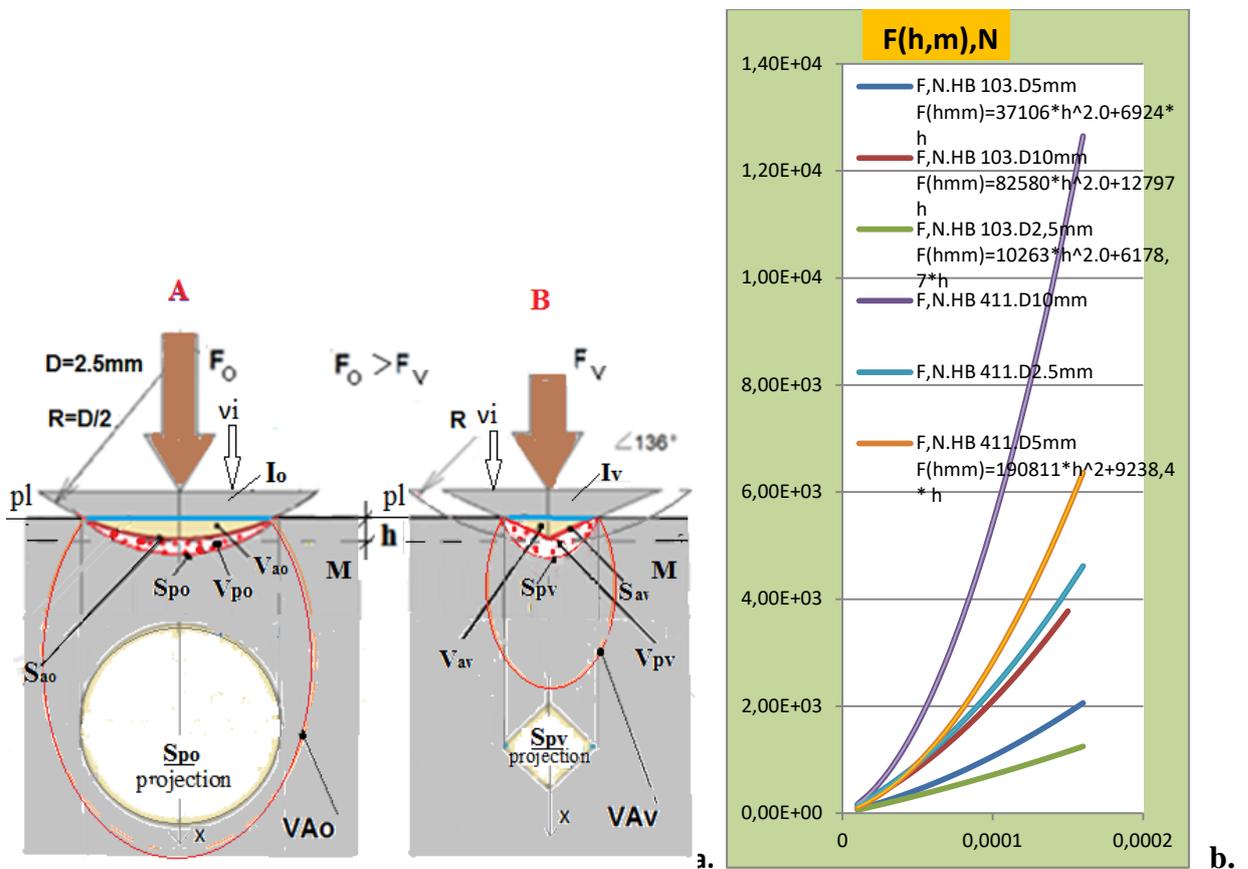


Рис.1а,б: а. Схема, продольный разрез, процесс формоизменения материала для макро индентирования, в одном масштабе: **A** - сферический индентор Бринелля; **B** - пирамида Виккерса; **б.** Кинетическое макро индентирование сферой, экспериментальные диаграммы $F(h,D)$, диаметр $D_{10}/5/2.5mm$, стандартные меры твердости HB103, HB411, данные [3];

Обозначения Рис.1: М – материал; I_o - сферический индентор Бринелля, I_v – пирамида Виккерса; Нижний индекс: о – сфера, v – пирамида. F_o, F_v - усилие на индентор; VA – **условный активированный объем**, в котором присутствуют **обратимые** (упругие напряжения) и **необратимые** процессы деформирования; D – диаметр, R - радиус сферы. Граница объема VA показана условно красной линией. Верхняя граница VA контактная поверхность образца материала. **Активированный объем** $V_a(h)$ - объем погруженной в материал части индентора. **Физический активированный объем** - V_p . Образуется из исходного материала М, в результате его сжатия, перемещения, формоизменения, необратимых структурно-энергетических преобразований, под действием силы F. Это объем, в котором произошли основные необратимые структурно-энергетические преобразования в процессе индентирования. h - перемещение индентора. v_i , m/s. – скорость движения индентора. Объем V_p ограничен поверхностями S_a и S_p . В нем находится материал в *высоко активированном квазжидком состоянии*. S_a - вся внешняя поверхность, созданная индентором. S_p - *условная внешняя граница* V_p объема. S_{ac} – поверхность контакта материала и тела индентора. В общем случае $S_a \geq S_{ac}$. Далее

предполагаем $S_a \approx S_{ac}$. pl – plane, базисная поверхность материала M . Проекция контактной поверхности: S_{po} , S_{pv} . В данном случае примем $V_a(h) = V_p(h)$. Рассмотрим схему процесса индентирования сферой Бринелля Рис.1А, сформулируем понятие термомеханическая система из элементов: индентор – материал – испытательный механизм (источник силы). Систему обозначим **TMS** (Thermomechanical System). Для TMS построим **термомеханическую физическую** модель кинетического процесса, обоснуем уравнение состояния V_p активированного объема материала.

Физическая модель термомеханической системы.

В результате движения индентора с некоторой малой скоростью $v_i = dh / dt$, между элементами системы возникает квазиравновесный процесс непрерывного обмена энергией. Перед контактной поверхностью тела индентора находится **активированный (перемещенный)** объем материала V_p , Рис.2. Он расположен между контактной поверхностью S_a и воображаемой вихревой волновой поверхностью S_p - граница состояний с разными структурно-энергетическими параметрами материала. В объеме V_p в результате кинетического индентирования (далее кратко **СИ**) формируются и сохраняются собственные высокие параметры состояния материала как активированной системы. Эти параметры отмечены звездочкой $*$. Применим специальный физический термин из монографии по термодинамике [3]. Автор утверждает, что с позиций статистической термодинамики и физики, сила F создает в материальном теле напряжение, давление, которые можно представить как **поток работы** в этой объеме термодинамической системы. Механическая сила F активирует на элементарном уровне структуры твердого тела корпускулярно-волновые процессы периодического движения потоков энергии квазичастиц между структурными единицами твердого тела (колебания плотности энергии, характеристические флуктуации) [1]. В деформированном твердом теле потоки энергии движения квазичастиц формируют поля напряжений, давления, температуры. Это макроскопический процесс единой корпускулярно-волновой статистической природы, он характеризуется соответствующими физическими структурно-энергетическими молярными параметрами состояния [9,10]. В работе [1] использована физическая модель потока работы напряжений и давления в материальной среде для анализа кинетического процесса индентирования. На Рис.2 на примере макроиндентирования сферой показана физическая энергетическая модель кинетического процесса формоизменения и роста активированного физического объема твердого тела $V_p(h)$. Предполагаем, что процесс формирования высоких параметров квазиравновесного активированного состояния объема V_p происходит непрерывно при движении индентора. Изменение параметров структуры материала, преобразование энтропии состояния материала, происходит в некотором малом слое поверхности S_p (граничная область). Подготовительный этап релаксации, формирования устойчивого процесса преобразований, предполагается завершенным при $h > h^*$. На Рис.2 граничная область S_p обозначена символами \mathcal{D} . Это граница структурно-энергетических преобразований материала при формировании объема V_p . На внешней поверхности S_p происходят все необратимые процессы трансляционно-ротационных преобразований структуры

исходного состояния материала, освобождается скрытая энергия [1]. Параметры исходного состояния материала T – температура, P – давление, \hat{S} – энтропия.

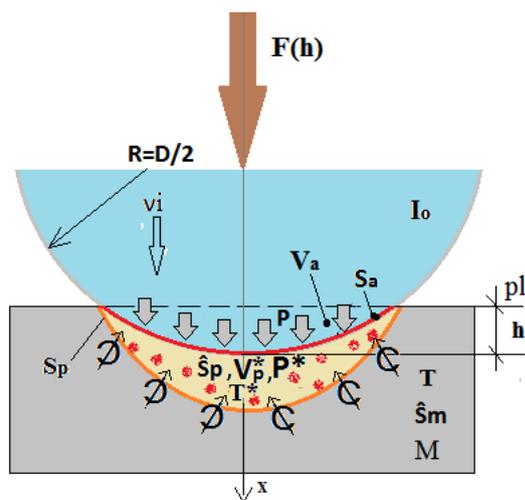


Рис.2 Физическая модель активированного объема материала V_p^* как термомеханической системы.

Предполагаем, что процесс **СИ** формирует на поверхности S_p , новые внутренние параметры состояния структурных единиц P_p^* , \hat{S}_p^* , T_p^* и транслирует эти параметры в объем V_p . Для описания параметров состояния физического объема V_p используем методы статистической термодинамики [12]. Для описания процесса используем свойства энтропии структурного состояния деформируемого твердого тела [13], физическую теорию прочности [10]. Предположим, нам задано начальное значение энтропии \hat{S}_m (без нагрузки F), которое однозначно характеризует начальное structural energy state материала (**SES**). Подобный подход использован в [13]. В процессе **СИ** в активированном объеме V_p накапливается материал в новом значении энтропии \hat{S}_p^* . Объем V_p^* аккумулирует дополнительную энергию от распада (преобразования) исходной кристаллической структуры, преобразования энергии упругих напряжений, тепловой энергии. В результате создается активированный объем V_p^* , в котором завершен переход из твердой фазы в квазижидкое состояние материала. Этот объем аккумулирует **освобожденную часть энергии** теплоты плавления исходного твердого состояния материала, от разрушения части структурных взаимодействий твердой фазы [1]. В процессе **СИ** объем $V_p(h)$ непрерывно растет, при этом поддерживается постоянное давление квазижидкости $P_p^* = \sigma_{sh}^* = \text{const}$. Во внешнем большом объеме V_{Ao} напряженное состояние меняется, напряжений шаровый тензор сжатия материала $\sigma_{sh}^*(h)$ растет. После завершения начального периода релаксации, $h > h^*$, h^* - глубина участка релаксации, в объеме $V_p(h)$ установился квазиравновесный физико-

механический *равномерный (ламинарный) процесс CI с некоторой удельной мощностью*. Если $h > h^*$, в слое \mathcal{D} наступил равномерный, однородный, стабильный процесс перехода исходного материала в новое активированное состояние. Таким образом, при движении сферического индентора диаметром D , с некоторой малой постоянной скоростью \mathbf{v}_i , происходит непрерывный, стабильный, ламинарный процесс перемещения, формоизменения, структурных преобразований и роста объема $V_p(h)$ с параметрами P_p^* , \hat{S}_p , T_p^* . Исследования показали [1], что для создания таких идеальных условий, сферический индентор должен иметь диаметр $D > D_{min}$. Где, D_{min} - достаточно большой диаметр индентора, необходимый для поддержания монотонного ламинарного процесса преобразований структуры материала при перемещении индентора [1]. В этом случае величину активированного объема $V_p(h)$ можно рассматривать как обобщенную координату процесса **CI**. Это некоторая монотонная возрастающая функция TMS.

Мы сформировали термомеханическую модель ламинарного процесса кинетического индентирования сферой активированного объема TMS. Рассмотрим её физические свойства.

Физический термомеханический потенциал, функция состояния макроскопической системы активированного объема материала.

Рассмотрим $V_p(h)$, как статистическую термодинамическую систему используя общие положения термодинамики, физической теории прочности и разрушения твердых тел. Предположим, что все подготовительные физические структурно-энергетические процессы преобразования материала происходят вне объема $V_p(h)$ в граничной области, она обозначена символом \mathcal{D} Рис.2. Исходные параметры материала: P , T , \hat{S} . На внешней границе S_p объема происходят непрерывные структурно-энергетические преобразования материала. Через физическую границу S_p в объем $V_p(h)$ происходит движение потока энергии, трансляция материальных частиц с новыми физическими параметрами состояния. Объем $V_p(h)$ сохраняет собственные параметры состояния, обозначенные звездочкой: $P \rightarrow P_p^*$, $T \rightarrow T_p^*$, $\hat{S} \rightarrow \hat{S}_p^*$. В результате активированный объем $V_p(h)$ непрерывно увеличивается. При этом происходит его формоизменение и перемещение вместе с индентором. Предположим, нам задана функция состояния $U(P_p^*, V_p^*, T_p^*, \hat{S}_p^*)$ данного активированного объема $V_p(h)$ материала, как статистической термодинамической системы. Из физической теории [12] потенциал внутренней энергии состояния системы равен:

$$U = Q - A, \quad J, \quad (3)$$

Где, U – потенциал внутренней энергии термодинамической системы. Q - энергия тепла переданная системе. A – работа внешних сил совершенная над системой.

$$A = \int PdV, \quad Q = \int Td\hat{S}. \quad T = \text{const}, \quad P = \text{const}. \quad (4)$$

Из (3) и (4) с учетом принятых обозначений для активированного объема $V_p(h)$:

$$U_p = T_p^* \hat{S}_p^* + P_p^* V_p^*, \quad (5)$$

$$\text{Где, } P_p^* = \text{const}, T_p^* = \text{const}, \hat{S}_p^* = \text{const}.$$

Объем V_p непрерывно растет, но параметры $P_p^*, T_p^*, \hat{S}_p^*$ постоянные. В результате изменений структуры внешней среды через границу S_p в объем $V_p(h)$ поступает энергия. Это результат трансляции нового структурно-энергетического состояния на дополнительный объем материала. Идет изменение энтропии структуры $\hat{S}_p \rightarrow \hat{S}_p^*$. Объем $V_p(h)$ системы увеличивается, при этом в ней поддерживается квазиравновесное состояние. Таким образом, количество вещества, суммарная энергия U_p и объем $V_p(h)$, непрерывно растут. Энергия в активированный объем поступает из внешней области, поэтому знак работы потенциала A в (3) следует изменить на плюс. Предположим, что основная часть энергии индентирования, затраченной в необратимом процессе, рассеяна в объеме $V_p(h)$. Таким образом, активированный объем представляет эквивалентную **термомеханическую** систему (TMS) кинетического процесса. По определению термодинамическая система имеет постоянное количество вещества. Количество вещества, объем нашей системы монотонно растут. Выполним условный переход к **термодинамической** системе с постоянным объемом и количеством вещества, перейдем к анализу свойств единицы объема нашей системы.

Потенциал обобщенной удельной мощности индентирования. Эталон и физическая величина макротвердости.

Предположим, что при ламинарном кинетическом макро индентировании существует физический термомеханический потенциал активированного объема $V_p^*(h)$, пусть он равен U_p . Предположим, что потенциал представляет скалярное поле, монотонная дифференцируемая функция некоторых параметров этой системы. Согласно [14] объемный дифференциал потенциала U_p (6), это предел отношения приращения энергии и приращения активированного объема:

$$\frac{dU_p}{dV} = \frac{d(T_p^* \hat{S}_p^* + P_p^* V_p^*)}{dV}, \quad J/m^3. \quad T^* = \text{const}, \quad P^* = \text{const}. \quad (6)$$

Обозначим этот объемный дифференциал приращения энергии:

$$PHM(V_p) = \frac{dU_p}{dV}, \quad J/m^3 \quad (6a)$$

Таким образом, мы нашли изменение плотности *энергии в единице* активированного объема данной системы при кинетическом макро индентировании. Поскольку глубина h , объем V и скорость процесса v_i однозначно связанные между собой величины, то время процесса и объем индентирования взаимно однозначны. Следовательно, можем для (6а) применить термин *обобщенная удельная мощность изменения энергии в единице* активированного объема. Сокращенно (6а), $\text{PHM}(V_p)$ - *потенциал удельный обобщенной мощности макро индентирования*. В этом случае, объем независимая переменная, $V_p = V$. В результате мы получили (6а) обобщенный изохорно – изобарно – изотермический *термодинамический* потенциал обобщенной мощности активированного объема твердого тела в результате СІ. Согласно условию (5) энтропия и температура увеличивающегося объема V постоянные величины $\widehat{S}_p^* = \text{const}$, $T^* = \text{const}$, следовательно $\partial U_p(T_p^*, \widehat{S}_p^*) = 0$. Далее не пишем индекс звездочка физического активированного объема. Предположим, что вся работа A направлена на процессы формоизменения и структурно-энергетические преобразования исходного состояния материала, при формировании активированного объема $V_p(h) = V(h)$. В этом случае термомеханический потенциал $A(V)$ активированного объема:

$$U_p = P_p V_p = A(V) \quad (6.1)$$

Согласно ISO 14577 [10], работа $A(h)$ силы $F(h)$ затраченная на формоизменение объема материала при перемещении индентора:

$$A(V) = A(h) = \int_0^{h_0} F(h) dh \quad (6.2), \quad A' = \partial A / \partial h = F(h) . \quad (6.3) ,$$

$$U_p = \int_0^{h_0} F(h) dh . \quad (6.4)$$

Далее полагаем $V_p = V_a$, для простоты записи нижний индекс опускаем $V_p = V_a = V$. Используя (4), (6), (6.1), получим объемный дифференциал, назовем его *потенциал удельный обобщенной мощности макро индентирования материала*:

$$\text{PHM}(V) = \frac{dA(V)}{dV}, \text{ J/m}^3 \quad (7)$$

Согласно общей теории поля [14] потенциал удельной мощности индентирования (7) связан с градиентом плотности поля энергии на поверхности активированного объема:

$$\text{PHM}(V) = \text{grad}A = \frac{\partial A}{\partial V_x} + \frac{\partial A}{\partial V_y} + \frac{\partial A}{\partial V_z} = \text{PHI}_x(h) + 2\text{PHI}_z(h) \quad (7.1)$$

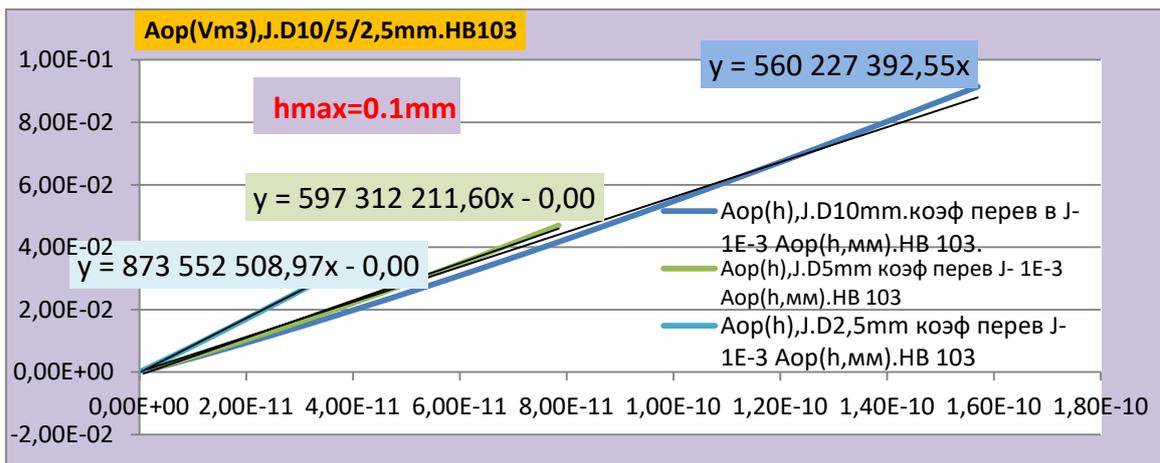
Где, $\text{grad}A$ - градиент $A(V)$ на поверхности S_a активированного объема $V(h)$,

$$PHI_x(h) = \frac{\partial A}{\partial V_x}, PHI_y(h) = \frac{\partial A}{\partial V_y}, PHI_z(h) = \frac{\partial A}{\partial V_z}, PHI_y(h) = PHI_z(h), PHI_{x,y,z}(h) - \text{компоненты}$$

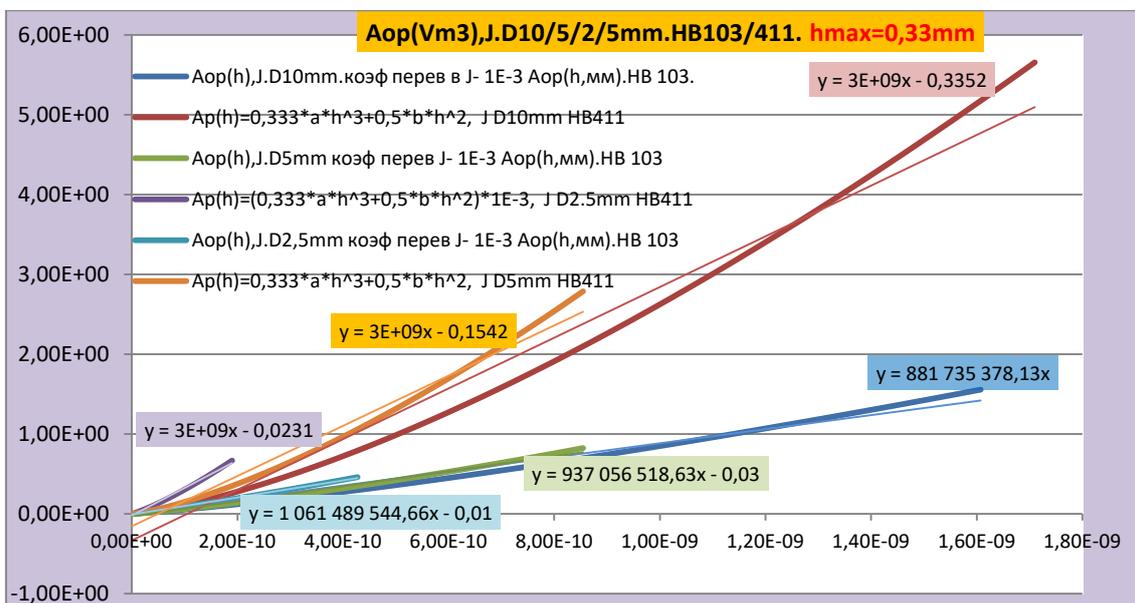
градиента потенциала A по осям декартовых координат. Применим физическое определение к потенциалу удельной мощности $PHM(V)$, (7.1) - **градиент плотности поля энергии активированного объема в процессе СИ на граничной поверхности S_a** . Потенциал $PHM(V)$ так же можно рассматривать как количество энергии протекающей через поверхность активированного объема, в процессе изменения плотности энергии структуры материала активированного объема при формоизменении. Градиент (7.1) – суммарная удельная обобщенная мощность потока плотности энергии через поверхность активированного объема материала V в процессе СИ.

*Экспериментальные свойства потенциала удельной обобщенной мощности индентирования.
Физический эталон макротвердости.*

В работе [1], на основе анализа экспериментальных диаграмм $F(h)$ [3], кинетического макро индентирования сферой разного диаметра стандартных образцовых мер различной твердости, получены функции физического термомеханического потенциала $A(V, m^3)$. На Рис.3 показаны функции $A(V, m^3)$, интеграл функции $F(h)$.



a1.



a2.

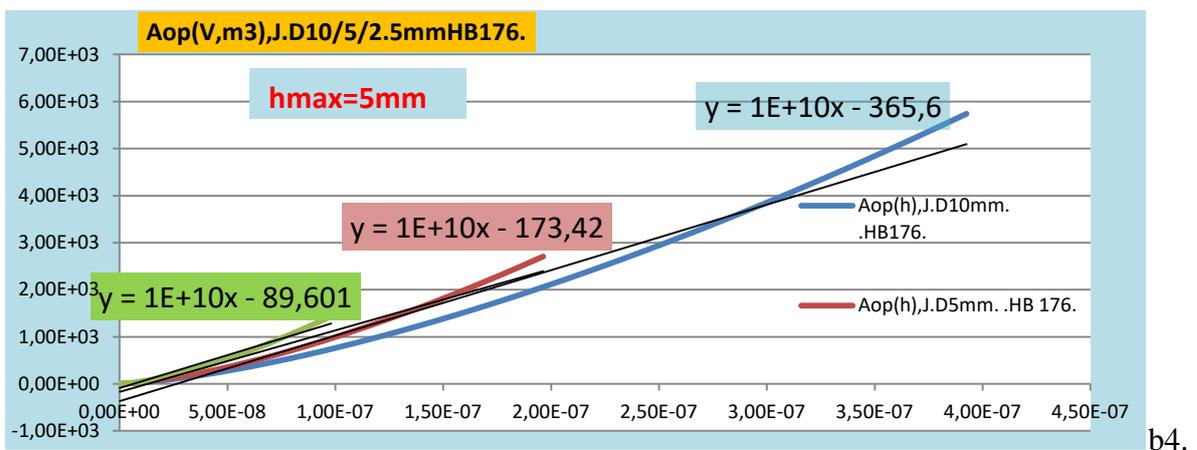
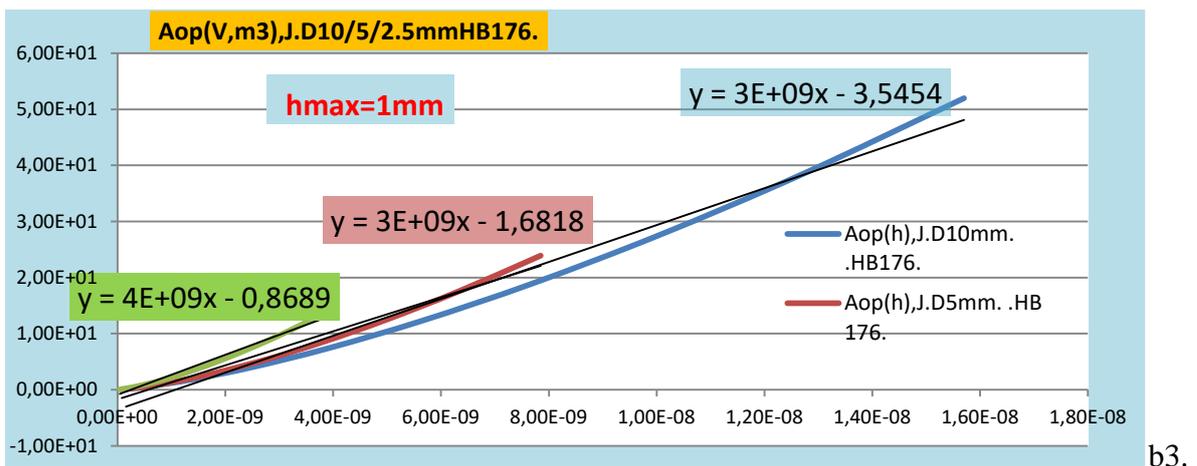
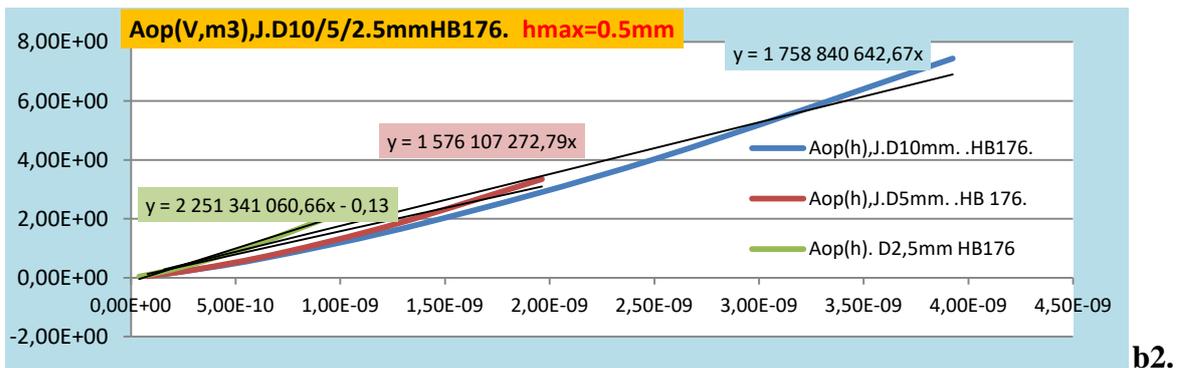
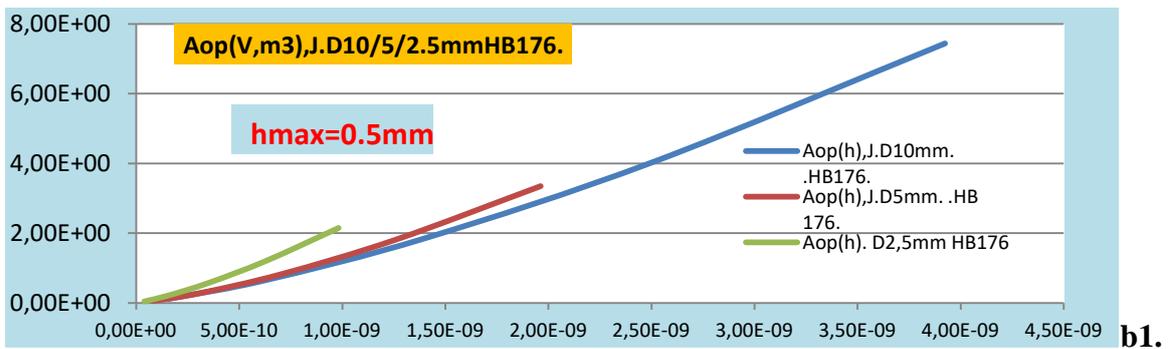


Рис.3а,б. Аппроксимация потенциала $A(V, m^3), J$ кинетическое ламинарное макро индентирование. Индентор сфера D10/5/2,5mm. Показано уравнение и параметр линейного тренда $A'(V)_v$ для каждой функции. Использован Excel 2007: **а)1,2** стандартные меры твердости HB103/411, диапазон $h_{max}=0,1$ и $0,33mm$; **б)1,2,3,4** HB 176. диапазон $h_{max}= 0.5/1.0/5.0 mm$. Экспериментальные диаграммы $F(h)$ из [3].

Исследованы стандартные меры твердости, диаметр сферы D10/5/2,5mm [2]: а) Меры НВ103/411, Диапазон измерений h=0,1-0,33mm; Рис.3b Мера НВ176. Диапазон hmax=0,5-5.0mm. Получены уравнения линейного тренда аппроксимации каждой функции (обозначены $y = A'_v \cdot x$). Для этого использован Excel-2007, построены линейные тренды $A(V, m^3)$, черная линия (a1, b2), цветная линия (a2,b1). На основании анализа экспериментальных результатов, пример Рис.3, были аналитически определены формула (7), значения потенциала удельной обобщенной мощности индентирования $A'(V)_v$. Построен линейный тренд термомеханического потенциала $A(V)$ и найден параметр этого тренда, который равен потенциалу удельной мощности:

$$PHM(HB) = A'(V)_v = \frac{\Delta A}{\Delta V} \approx \frac{dA}{dV} = \text{const}, J/m^3 \quad (7.2)$$

Где, $A'(V)_v$ - параметр линейного тренда функции $A(V)$, согласно (7) это потенциал удельный обобщенной мощности индентирования далее мы применим к нему термин: **физическая макро твердость ламинарного индентирования материала**. Это интегральная энергетическая характеристика изменения структурно-физических свойств материала в процессе СИ. Результаты расчета физической макротвердости или потенциала $PHM(HB)$ индентирования разных мер твердости в Таблице 1.

Физическая твердость, по результатам индентирования стандартной меры сферой Таблица 1.

стандартная мера твердости	Среднее значение физической твердости индентирования $PHM(HB), J/m^3$	Значения физической твердости индентирования для меры твердости НВ103/176/411, диаметр 10/5/2.5 (D, mm.) $PHM(HB) = A'(V)_v, J/m^3$		
HB411	$3.2 \cdot 10^9$	$3,1 \cdot 10^9, (D2,5)$	$3,1 \cdot 10^9, (D2,5)$	$3,4 \cdot 10^9, (D10)$
HB176	$1.85 \cdot 10^9$	$2,23 \cdot 10^9, (D2,5)$	$1,58 \cdot 10^9, (D5)$	$1.76 \cdot 10^9, (D10)$
HB103	$0.94 \cdot 10^9$	$1.0 \cdot 10^9, (D2,5)$	$0.94 \cdot 10^9, (D5)$	$0.89 \cdot 10^9, (D10)$

Из (7) и результатов анализа экспериментальных данных следует, термомеханический потенциал $A(V)$ на большом интервале h представляет линейную функцию:

$$A(V) = PHM(HB) \cdot V_a = A'(V)_v \cdot V_a, J \quad (7.3)$$

Вывод. При ламинарном макро СИ сферой Бринелля процесс формоизменения материала характеризуется линейной функцией. Объемный потенциал $A(V)$ равен произведению потенциала физической макротвердости материала (7.2) и

активированного объема $\cdot V_a$. Другая формулировка зависимости (7.3): объемный потенциал активированного объема макро ламинарного индентирования $A(V)$, равен произведению потенциала удельный обобщенной мощности индентирования (7) $RHM(HV)$ и активированного объема V_a .

В общем случае объемный потенциал $A(V)$ представляет нелинейную функцию, свойства которой зависят от однородности и анизотропии материала, формы индентора, величины усилия и глубины перемещения h в процессе СИ. Мы рассматривали процесс СИ для однородного, изотропного, стабильного материала, эти свойства имеют стандартные меры твердости, которые мы использовали в работе.

$RHM(HV) = A'(V)_v$ - потенциал физической макротвердости ламинарного индентирования материала сферическим индентором (7.2). Получена устойчивая, объективная экспериментальная физическая характеристика макротвердости твердого тела, которая не зависит от размеров индентора *и может быть универсальным физическим эталоном измерения макротвердости*. Наши исследования выполнены для индентора в форме сферы с разным диаметром, постоянная скорость перемещения, материал однородный, изотропный, стабильный. В интервале глубины $0.1 < h < 0.33\text{mm}$ индентирования сферой получено устойчивое значение потенциала физической твердости $RHM(HV)$. Физическая твердость $RHM(HV)$, полученная для стандартной меры равна числу твердости данной меры по Бринеллю $RHM(HV_i) = HV_i$ но в размерности J/m^3 . В Таблице 1, для HV103, HV176, этот случай выделен зеленым цветом. Равенство значений имеет место, если глубина эмпирического индентирования стандартной меры (в эмпирических методах она не контролируется) попадает в интервал глубины измерений потенциала $RHM(HV)$. Совпадение физической и эмпирической твердости имеет место, если выполнено условие физического подобия процессов, глубина индентирования при измерениях числа твердости сферой попадает в интервал измерений для физического метода. Расхождение значений физической и эмпирической твердости имеет место, это результат статистического разброса свойств материала и влияние случайных факторов в методе измерений.

Метод расчета физической твердости $RHM(HV)$ материала, на основе аналитической обработки кинетической диаграммы $F(h)$, имеет ряд достоинств. Отсутствует размерный эффект. Влияние диапазона и интервала измерений на число физической твердости, незначительно, его можно исключить, применяя специальную форму индентора (например, усеченный конус Калверта-Джонсона). Физические методы анализа данных кинетического индентирования позволяют аналитически обоснованно устранить вредное влияние различных факторов в стандартной методике испытаний на величину физической твердости $RHM(HV)$. При расчете потенциала $A(h)$ материала можно учесть влияние формы индентора, влияние интервала интегрирования. Физическая методика определения твердости материала по силовой диаграмме кинетического индентирования снижает требования к точности и технологии измерительного процесса и др. Обсуждение достоинств и свойства нового метода тема отдельной статьи.

Физическая твердость рассматривает суммарную энергию процесса, не разделяя пластические и упругие деформации.

Результаты наших исследований и выводы совпадают с идеями авторов работы [7], в которой предложено использовать удельную энергию индентирования в качестве показателя твердости материала. В работе [15] для устранения размерного эффекта предлагают фиксировать размер отпечатка (глубину) при измерениях твердости, эти предложения подтверждают результаты наших теоретических исследований.

Физический процесс СИ в нано-микро-макро диапазоне острым инструментом пирамидой, конусом, нано сферой и др. характеризуется особыми параметрами, собственным уравнением индентирования [1]. Теоретические методы определения физической твердости и др. параметров для нано микро диапазона и учет влияния особенностей формы индентора исследованы в работе [1].

References.

1. Н.А.Штырёв. Физическая теория прочности. Гл.7 . Методы определения физических структурно-энергетических молярных параметров конструкционных материалов. //energydurability.com, 2020.
2. F. Grace Calvert, Richard Johnson. On the hardness of metals and alloys. JFI, volume 67, issue 3, march 1859, pages 198-203.
3. В.И. Мощенок Современные методы определения твёрдости. LAP Lambert. 2019. - 382с.
4. ISO 14577-1:2002. Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Test method.
5. И. Головин. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрообъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках (Обзор). Физика твердого тела, 2008, том 50, вып. 12, с.2113-2142
6. Мильман Ю.В., Гринкевич К.Э., Мордель П.В. Энергетическая концепция твердости при инструментальном индентировании // Деформация и разрушение материалов. 2013. № 1. С. 2-9.
7. P.M. Ogar et al. Application of the curves of kinematic indentation by a sphere to determine materials' mechanical properties. P.M. Ogara, V.A. Tarasovb, A.V. Turchenkoc, I.B. Fedorov. Systems. Methods. Technologies. 2013 № 1 (17) p. 41-47
8. Н.А.Штырёв. Деформирование и разрушение твердых тел при нестационарных нагрузках с позиций кинетической структурно-энергетической теории прочности. «Вибрации в технике и технологиях» ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев, №1(77) 2015г, с.55-61.
9. Н.А.Штырёв. Деформирование и разрушение твердых тел с позиций кинетической структурно-энергетической теории прочности. // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій. Збірник наукових праць 5-ї Міжнародної конференції під заг. ред. В.В. Панасюка. 2014, Львів. ФМІ, Україна, с 63-70.
10. N. Shtyrov Theoretical assessment of the mechanical characteristics of the strength of steel using the dependencies and parameters of the physical theory of a deformed solid. №7. 2019. //energydurability.com
11. Shtyrov N. Physical Methods and Parameters for Assessing the Strength, Fatigue, Durability and Damage to a Structural Material. Journal of Mechanics Engineering and Automation. № 9 (2019) , 84-91.
12. Ю.Б.Румер, М.Ш.Рывкин. Термодинамика статистическая физика и кинетика, «Наука», 1977, 552с.
13. Дзюба В.С. Прочность и деформирование армированных пластиков с учетом механической повреждаемости. Сообщение 1. Уравнения состояния армированных пластиков с учетом механической повреждаемости и физико-химических превращений. Проблемы прочности. 1979г. №10 с. 38-42 .
14. И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. Справочник по математике. М. Наука, 1965г.608с.

15. Ю.В. Мильман, А.А. Голубенко, С.Н. Дуб. Определение нанотвердости при фиксированном размере отпечатка твердости для устранения масштабного фактора. ISSN 1562-6016. ВАИТ. 2015. №2(96).

Part 2.

Физические свойства функции и числа эмпирической макротвердости материала. Универсальная физическая единица измерения макро твердости.

1. Функция и число эмпирической макротвердости, физические свойства. Метод сравнения значений физической и эмпирической макро твердости.

Рассмотрим на примере индентирования сферой свойства функции $HI(h)$ и числа эмпирической макротвердости материала используя физический анализ. Обсудим причину размерного эффекта. Подробно результаты изложены в [4]. На Рис.1b характерный вид **СИ** диаграммы $F(h)$, сферический индентор разного диаметра, стандартные меры твердости HB103 и HB411. На Рис. 4a,b диаграммы эмпирической твердости, полученные по формуле $HI(h)=F(h)/S(h)$. Здесь $S(h)$ – условная площадь контакта и распределения действия силы F на материал.

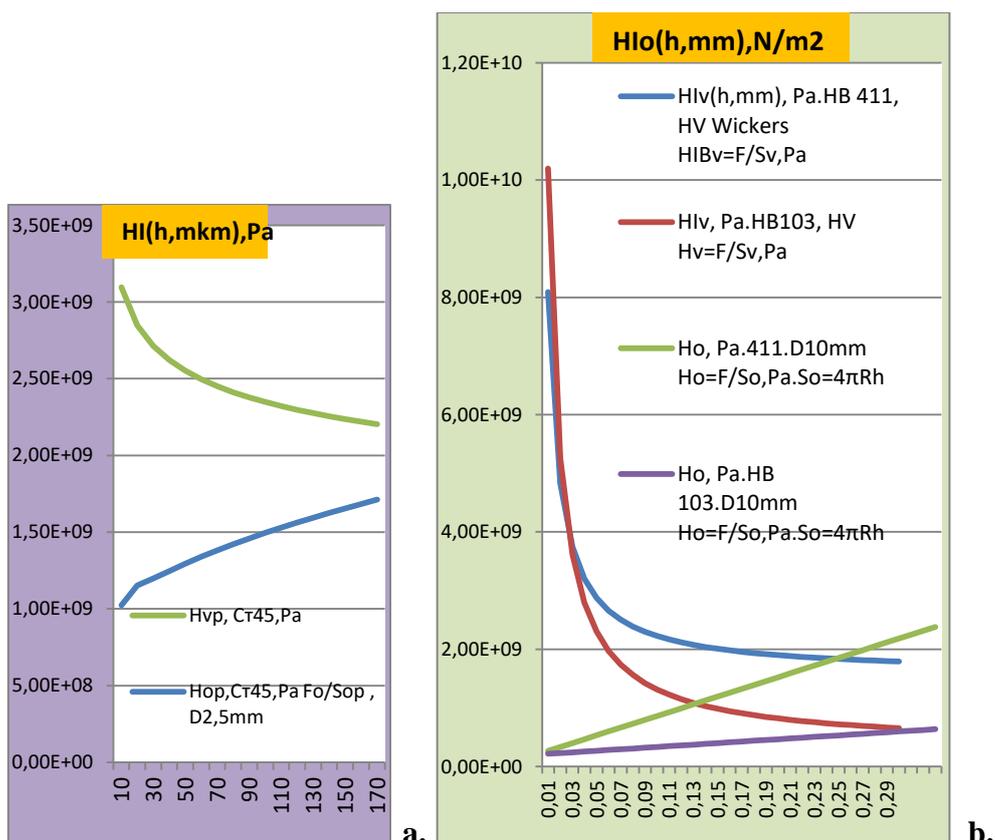


Рис. 4. Кинетическое макро индентирование сферой и пирамидой. Диаграммы $HI(h)$ эмпирической макро поверхностной твердости: **a)** Экспериментальные. Верхняя кривая пирамида Виккерса, нижняя сфера Бринелля D2,5mm. Сталь 45, данные [11]; **b)** Расширенный диапазон диаграммы $HI=F/S_o$, эмпирическая твердость, (9.6) HB103/411, D10mm, pyramid Wickers, построены аналитически, исходные данные [2].

$HI(h)$ – эмпирическая твердость по Бринеллю, имеет условную размерность N/m^2 , это условное давление или условное напряжение сжатия на поверхности контакта. Обычно площадь $S(h)$ определяется формулой предложенной в методике измерения твердости. В расчетах твердости применяют условные геометрические характеристики поверхности созданной в процессе вдавливания тела индентора в материал. Формулы определяют площадь условной поверхности вмятины или отпечатка (вмятина после снятия силы F), проекцию поверхности и др. Все формулы расчета площади S приближенные, условные, эмпирические, не имеют корректной физической связи с внутренними необратимыми процессами преобразований структуры материала. Модели пластических деформаций материала относятся к теории механики деформированного твердого тела, в них нет статистической физики. Задача физической теории установить связь изменений структурно-энергетических параметров материала и эмпирических параметров (F, S, V, h) кинетического индентирования. На примере метода Бринелля рассмотрим связь числа и функции эмпирической и физической твердости.

В (7.1) определен градиент плотности поля энергии термомеханического потенциала индентирования A на поверхности активированного объема. Так же мы обозначили, что градиент потенциала индентирования - **физическая макро твердость ламинарного индентирования материала**. В декартовых координатах полное приращение $gradA$ активированного объема это сумма частных дифференциалов, назовем их компоненты градиента потенциала плотности, согласно (7.1):

$$gradA = \frac{\partial A}{\partial V_x} + \frac{\partial A}{\partial V_y} + \frac{\partial A}{\partial V_z} = PH_{x,h}(h) + 2PH_{z,h}(h) \quad (9)$$

Форма индентора (сфера, пирамида и др.) влияет на величину каждой компоненты $PH_{x,y,z}(h)$. Величина приращения компоненты зависит от оси координат и формы поверхности активированного объема, соответственно и формы индентора. Согласно теории градиента [9], каждая компонента характеризует приращение плотности энергии потенциала A на поверхности S активированного объема. Следовательно, каждая компонента градиента (7.1) характеризует изменение плотности энергии в направлении выбранной оси. В направлении каждой оси имеем определенную удельную обобщенную мощность $PHM_{x,y,z}(h, HB)$. Компонента потенциала физической твердости зависит от выбранного направления, глубины, твердости материала и формы индентора. Обозначим $PH_x(h, HB)$ - *главная компонента градиента обобщенной мощности макро индентирования* материала в направлении h . Исследуем главную компоненту градиента потенциала в направлении движения индентора, ось X , Рис.1а, $h = x$. *Объемный частный дифференциал A_x по h (ось X):*

$$PH_{x,h}(h, HB) = \frac{\partial A_x}{\partial V_x} = \frac{\partial A}{V'_p(h)\partial h} = \frac{A'(h)\partial h}{V'(h)\partial h} = \frac{A'(h)}{V'(h)} = \frac{F(h)}{V'_o(h)}, N/m^2 \quad (9.1)$$

$$\text{Где, из (6.3) } A' = \partial A / \partial h = F(h), \quad \partial V_x / \partial h = V'(h). \quad (9.2)$$

Для ламинарного макро индентирования $A_x = \mu A$, μ - параметр влияния формы и направления оси на функцию $S_{x,y,z}(X, Y, Z)$ компоненты площади поверхности индентора, для сферы, $h \gg 0$, приближенно примем $\mu \approx 1$, получим $A_x \cong A$.

Из аппроксимации функции $F(h)$ полиномом, для сферы и пирамиды [2] имеем:

$$F(h) = ah^m + bh^{m-1} + c \quad (9.3)$$

Где, a, b, c, m – константы аппроксимации $F(h)$. В работе [4] для макро СИ шаром Бринелля и пирамидой Виккерса, для стандартных мер твердости установлено: $m = 2$, значения $a = a_0$, $b = b_0$ в работе [4], $c = 0$. Из (9.1), (9.2), (9.3) получим в общем виде:

$$PHI_x(h, HB) = \frac{\partial A_x}{\partial V_x} = \frac{F(h)}{V'_o(h)} = \frac{F(h)}{2\pi Rh} = \frac{F(h)}{S_{ax}} = \frac{a_0 h^2 + b_0 h}{2\pi Rh} = \frac{a_0 h}{2\pi R} + \frac{b_0}{2\pi R}, N/m^2, \quad (9.4)$$

Где, $V'_o = \partial V_o / \partial h = 2\pi Rh = S_{ax}$.

Подставим частную производную $V'_o = S_{ax}$ в (9.1) получим:

$$PHI_x(h, HB) = \frac{\partial A}{\partial V_x} = \frac{\partial A}{V'_p(h)\partial h} = \frac{\partial A}{S_{ax}\partial h}, N/m^2 \quad (9.5)$$

Из (9.5) очевидно, что главная компонента физической твердости или компонента обобщенной мощности индентирования функция $PHI_x(h, HB)$ - *удельное количество градиента потока энергии*, следовательно, значение определяется на единицу площади $S_a(h)$. Из (9.5) очевидно, что главная компонента градиента индентирования зависит от совершенной работы и площади контактной поверхности (соответственно от глубины). Таким образом, возможны два варианта представления компоненты градиента мощности или компоненты физической твердости макро СИ (9.1) и (9.4). Рассмотрим их детально:

Первый вариант. Размерность объемного дифференциала физической твердости индентирования J/m^3 , (7). Для формул сферы, (9.1), (9.4) в результате преобразований физическая размерность J/m^3 **вырождается (сокращается)**, получим **размерность эмпирической твердости** N/m^2 . Поэтому в формулах (9.4), (9.5) размерность условных напряжений. Формулы (9.1), (9.4), преобразуются в эмпирическую формулу твердости $HI(h)$ (9.6):

$$PHI_x(h, HB) = \frac{\partial A_x}{\partial V_x} = \frac{\partial A}{S_a \partial h} = \frac{F(h)}{2\pi Rh} = \frac{F(h)}{S_{a_0}(h)} = HI(h), N/m^2, \quad \text{Где, } S_a(h) = \delta \pi R h$$

Окончательно эмпирическая твердость – главная **компонента градиента обобщенной объемной мощности макро индентирования** $\partial A / \partial h$, **деленная на площадь** $S_{ax}(h)$:

$$PH_x(h, HB) = HI(h), N/m^2, (9.6)$$

Таким образом, эмпирическая твердость это дважды удельный показатель. **Эмпирическая твердость зависит от** плотности энергии A рассеянной в объеме V_0 и градиента плотности энергии на поверхности активированного объема, перемещенного в направлении оси $h-X$ и измененного по форме. Это главная компонента градиента (9.5) физической твердости, она равна эмпирической твердости (9.6). Характеризует изменение плотности энергии индентирования, при переходе от активированного объема к внешней области индентируемого материала, в направлении оси движения.

Второй вариант. Развернутая формула **компоненты физической твердости** CI сферой. Показывает связь с главными параметрами аппроксимации a_0, b_0 в функции $F(h)$, (9.3):

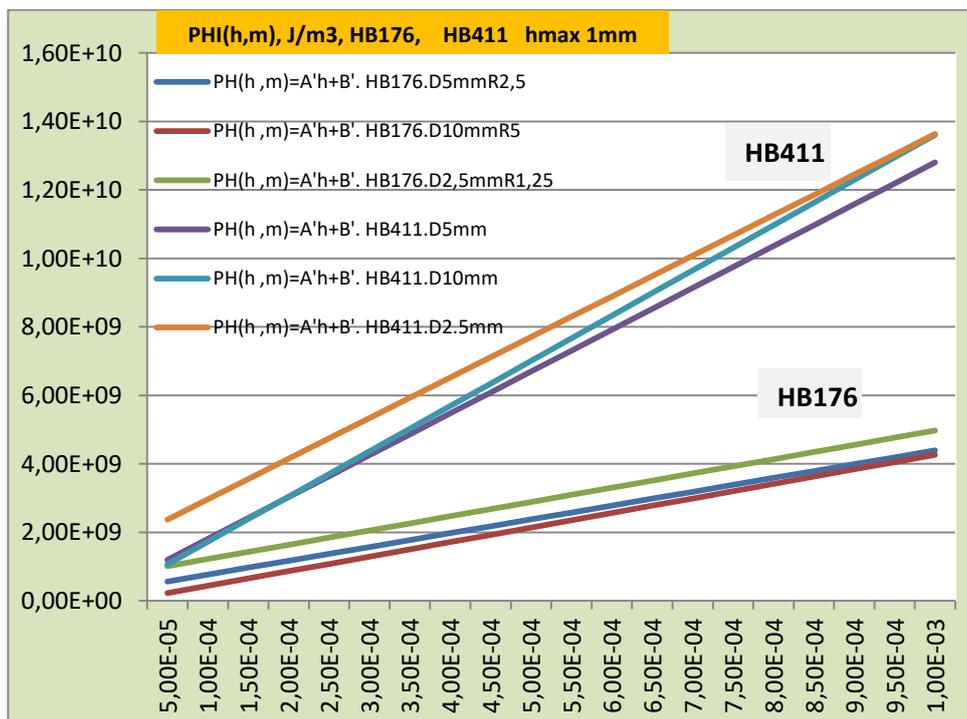
$$PH_x(h, HB) = \frac{\partial A(h)}{\partial V_a(h)} = \frac{a_0 h}{2\pi R} + \frac{b_0}{2\pi R}, N/m^2 \quad (9.7)$$

Подведем итог. Частный дифференциал $PH_x(h, HB)$, (9.5), (9.6), это так же функция эмпирической твердости материала в методе Бринелля. В этой функции присутствует главная компонента градиента (7.1), (9). Эмпирическая твердость – удельная характеристика потока работы напряжений. В процессе роста глубины h величина **значения эмпирической твердости**, главная **компонента градиента** для сферы **непрерывно** линейно **растет**. На Рис.5а пример $PH(h, HB)$ для материала разной твердости. На Рис.5b вместе показаны $HI(h)$ функция эмпирической твердости и функция $divA_x = PH(h, HB)$ компонента градиента, меры твердости HB411, сфера D5mm. Функции физической и эмпирической твердости одного материала (стандартной меры) совпадают. От твердости зависит угол наклона линейной функции $PH(h, HB)$ и $HI(h)$.

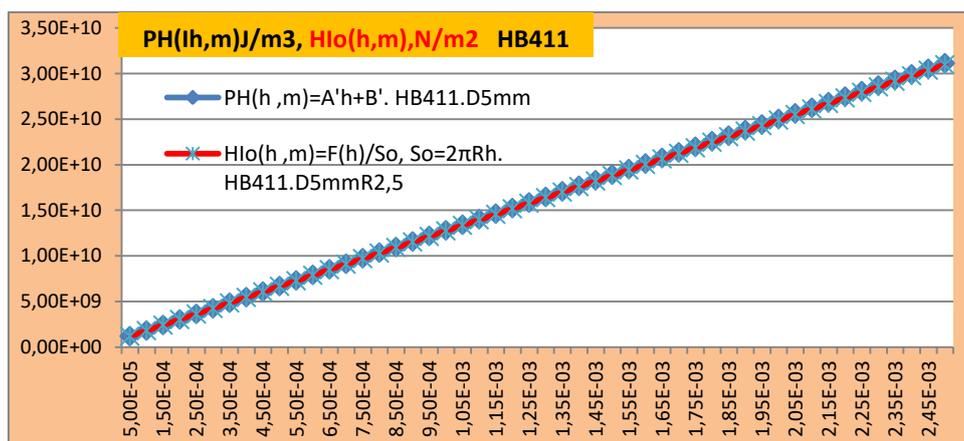
2. Критерий подобия для измерений физической и эмпирической макротвердости. Эталон макротвердости индентирования сферой.

На Рис.5а показаны характерные **функции** $PH(h, HB)$ для разной меры твердости HB176/411. Для одной меры твердости, независимо от диаметра, графики функций практически совпали. Для одной меры HB_i функция эмпирической твердости или компонента градиента физической твердости $PH(h, HB_i)$ инвариантны диаметру сферы, линии для трех разных диаметров D практически совпали. На Рис.5b показаны вместе функции $PH(h, HB_i)$ и эмпирическая твердость $HI_0(h)$ для меры HB411, они совпадают. Значение функции или число твердости, мы вычисляем для определенной глубины h . Величина, число твердости зависит от выбранной координаты – глубины индентирования h . Из анализа следует, что для **однозначного и корректного определения числа эмпирической твердости** материала, необходимо обеспечить одинаковые **физические условия или подобие** процессов испытаний материала разной

твердости, учитывать форму инструмента и глубину h . В данном случае, имеем макро индентирования сферой, *подобие физических условий* обеспечено при **одной заданной глубине h_{st} , независимо от диаметра сферы**. Для сферы эталоном при измерении твердости является - постоянная глубина индентирования. Одновременно это первое условие подобия физического процесса макро индентирования. На Рис.5D показан принцип определения значений эталонной твердости разных материалов макро индентором. При условии $h_{st} = h$ соблюдается физическое подобие процессов, для разных материалов, в данном случае стандартные меры твердости. В Таблице 2 показаны результаты расчета числа физической твердости для условного стандартного постоянного значения глубины индентирования $h_{st} = 0.25\text{mm}$.



a)



b)

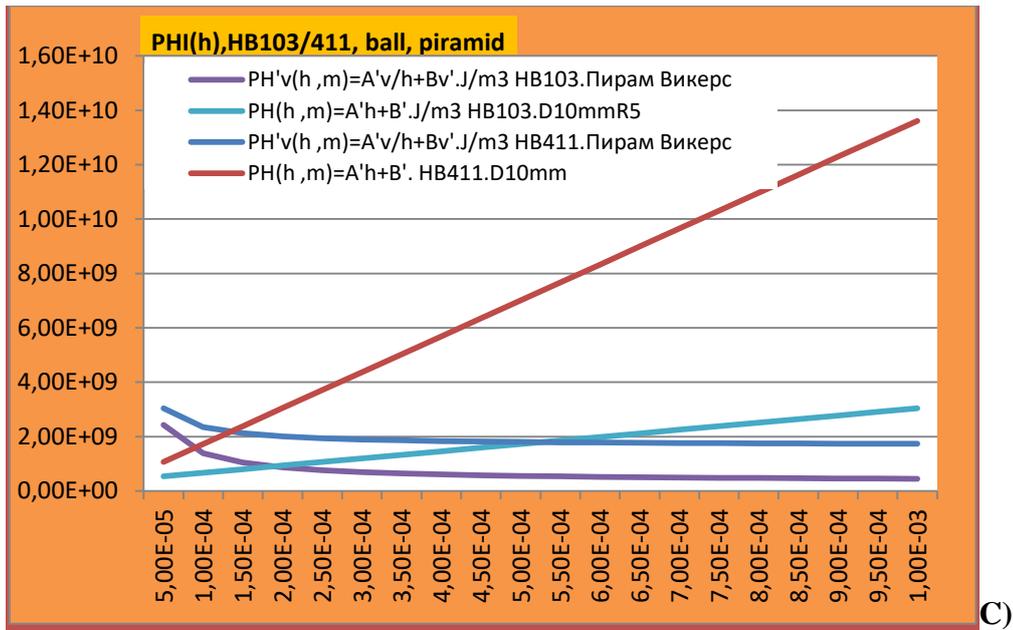


Рис. 5 Функция физической и эмпирической макро твердости **СІ**: а) физическая твердость $PH_i(h, HB, D_n)$, стандартная мера твердости HB176, HB411, диаметр D10/5/2.5 mm, по данным [2].; б) вместе показаны $PH(h)$ и $PH_i(h)$, HB411, D5/2.5 mm; в) Диаграммы $PH_i(h)$ сферы и пирамиды Виккерса.

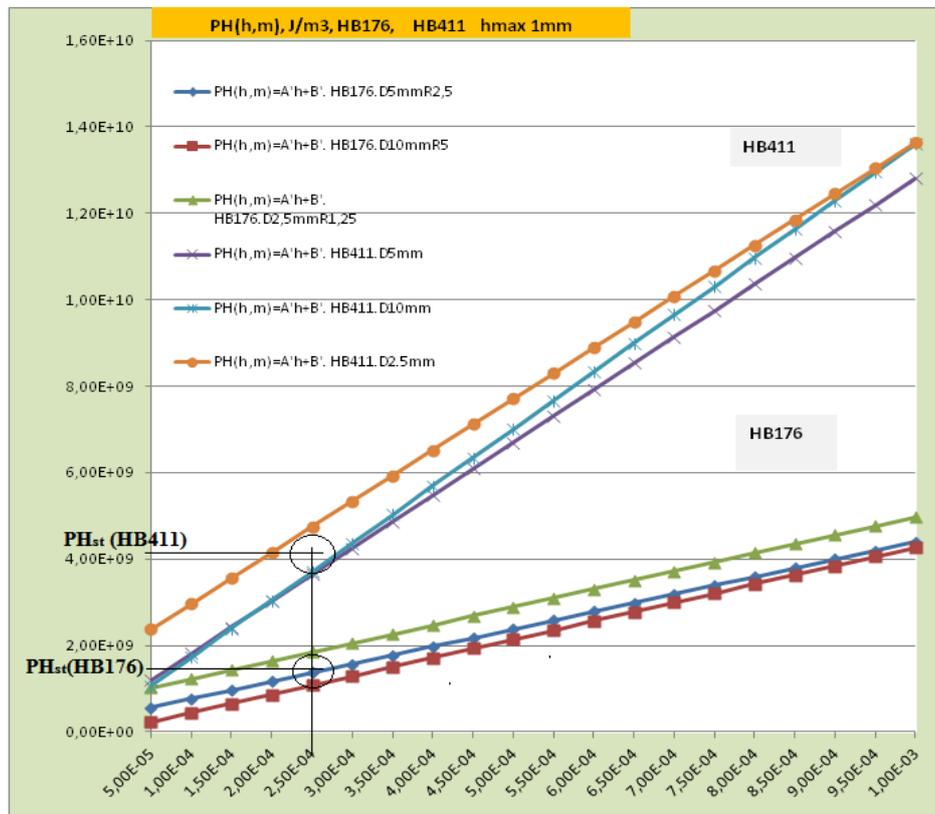


Рис.5D Определение значения эталона физической – эмпирической твердости, используя экспериментальные диаграммы физической твердости $PH_i(h)$, для стандартных мер HB176, HB 411, инденторы сфера $D=10,0/5,0/2,5mm$. Значение эталона физической твердости PH_{st} , приблизительно равно твердости стандартной меры. Эталон глубина $h_{st} = 0.25mm$.

На Рис.5с функции твердости $RH(h)$, мера НВ103, индентор сфера и пирамида Виккерса. У пирамиды (так же у конуса) функция имеет вид гиперболы, при изменении твердости график смещается, особенности процесса СИ острым индентором рассмотрены в [4]. Из свойств функции и определения физической твердости видим, подобие выполнено, если индентор в процессе движения СИ генерирует *одинаковую удельную величину площади поверхности* $\Delta S_a / \Delta V_a, 1/m$, для *разного материала и разной формы индентора*. Расчет и сравнение числа твердости разных материалов, инденторов, следует выполнять при физико-механическом подобии условий - *одинаковый прирост площади поверхности на единицу активированного* (вытесненного) объема V_a . Такие условия измерения твердости материала впервые создали Кальверт – Джонсон (1859г) [2]. В работе [4], для проверки соответствия условию подобия процесса макро СИ, предложена обобщенная физико-механическая характеристика (10) **функция формоизменения материала**:

$$X_{SV}(h) = \frac{S_a(h)}{V_a(h)} \quad (10)$$

$X_{SV}(h)$ - удельная площадь созданной (генерированной) поверхности на единицу активированного в процессе СИ объема материала. Значение функции, в общем случае, зависит от формы индентора и перемещения h . У сферы функция (10) имеет особое свойство (10.1), она не зависит от R , но зависит от глубины индентирования h и параметра δ в формуле контактной поверхности (δ определяется эмпирической методикой):

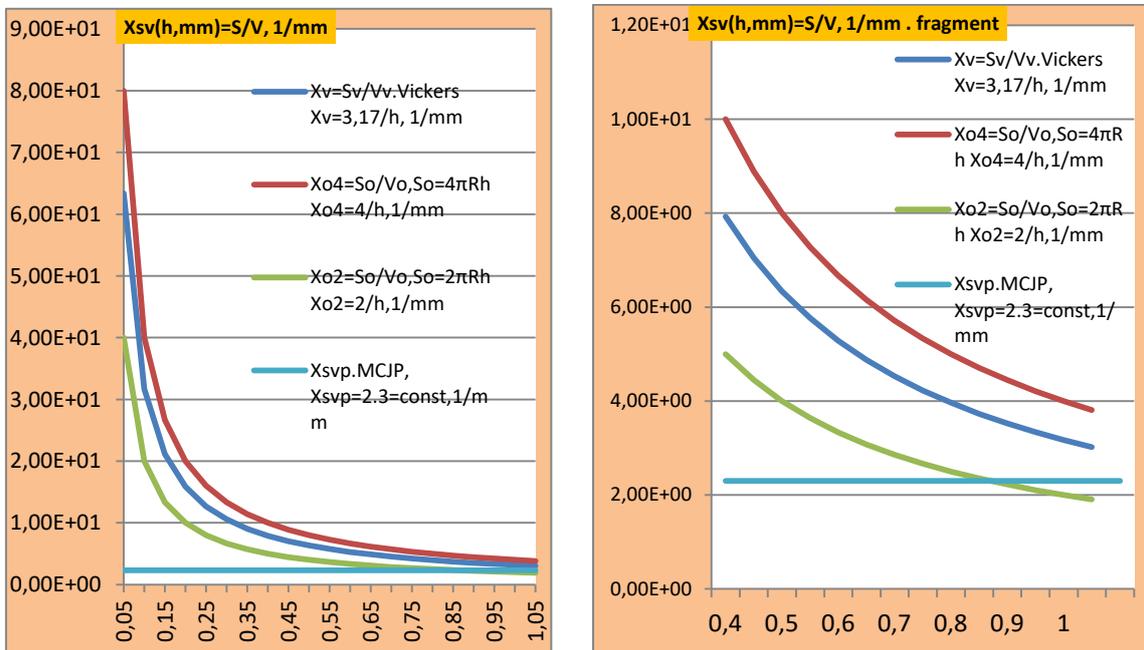


Рис. 6. Функция формоизменения $X_{SV}(h)$ объема для пирамиды, сферы, конуса МСJ. Для сферы $S_{ao}(h) = \delta \pi R h$, $\delta=2, \delta=4$. Индентор усеченный конус, метод МСJ, $X_{SVp.MCJ} \approx 2,3.1 / mm = \text{const}$

$$X_{SV_0}(h) = \frac{S_{ao}(h)}{V_{ao}(h)} = \frac{\delta \pi R h}{\pi R h^2} = \frac{\delta}{h}, \quad \delta = 2 \div 4 \quad (10.1)$$

$$\text{Для пирамиды: } X_{SV}(h) = \frac{\lambda}{h}, \quad (10.2)$$

Где, λ - параметр учитывающий влияние формы пирамиды $S_a = \lambda h^2$. Для пирамиды Виккерса $\lambda = 3,17$. На Рис.6 функции $X_{SV}(h)$ для индентора сфера, пирамида и усеченного конуса. Значение $X_{SV}(h)$ зависит от формы индентора и глубины h . На удельный показатель влияет формула расчета контактной поверхности $S_a(h)$, для сферы показан пример, две формулы $S_o(h)$. Условие подобия при измерении макротвердости:

$$X_{SV}(h) = \text{const}, \quad (10.3).$$

В *первом физически корректном* методе измерения твердости, разработан в 1859г [12] Кальвертом – Джонсоном (обозначим **МСЖ**), использован индентор усеченный конус, эта форма имеет свойство $X_{SV} \text{МСЖ} \approx \text{const}$, Рис.6. Далее о методе детально.

При измерении числа твердости в *ламинарном процессе СИ удельная площадь поверхности материала* должна быть одинаковая. В этом случае сохраняется подобие процесса измерений числа твердости и физически корректная шкала. На Рис.6b диаграммы $X_{SV}(h)$ видим, что условие подобия (10.3) приближенно выполняется, для сферы и пирамиды, если $h > 1.0\text{mm}$. С этой глубины $X_{SV}(h) \approx \text{const}$, физическая твердость мало зависит от глубины h , уменьшается влияние начального нелинейного участка, созданы условия для корректных измерений числа твердости СИ.

Значения эмпирической стандартной твердости НВ и потенциал физической твердости (7.3) РНМ(НВ) совпадают (близкие), если потенциал определен в интервале который содержит значение h , при котором определена твердость НВ по стандарту Таблица.1,2. При этом значения параметра формоизменения $X_{SV}(h)$ близкие.

Из анализа функций макро кинетического индентирования Рис.5,6,7 следует, что физически корректное сравнение значений эмпирической твердости, в стандартных испытаниях возможно, если использован индентор одной формы (сфера может иметь разный D). При определении числа твердости нужна постоянная глубина h_{st} , Рис5D.

Для разной формы индентора, физически корректное сравнение числа макротвердости возможно только при одинаковом значении параметра $X_{SV}(h)$, одинаковая глубина не обеспечивает подобия. Физическое подобие измерений эмпирической твердости разных методов, инструментов и материалов выполняется при условии (10.3).

В табл.2 даны значения стандартной эталонной физической дифференциальной твердости RH_{st} , определены формулой (9.2, 9.4), для $h_{st} = 0.25\text{mm}$, $D_i = 10/5/2,5\text{mm}$, три стандартные меры твердости НВ103/176/411 Физический эталон стандартной глубины $h_{st} = 0.25\text{mm}$ принят предварительно, для сравнительного анализа. В точке h_{st} значение RH_{st} и эмпирическое число стандартной меры НВW твердости по Бринеллю

приблизительно равны. Размерности величин физической и эмпирической твердости формально сводятся к одинаковой величине.

Физическая твердость стандартных мер для разного диаметра сферы. Таблица 2.

Механическая мера твердости HBW	RH_{st} средняя физическая твердость J/m^3	Значение эталонной физической твердости (9.4) $RH_{st} J/m^3$, различная мера твердости HB, диаметр 10/5/2.5 (D,mm). $h_{st} = 0.25mm$		
HB411	$403 \cdot 10^7$	$4,74 \cdot 10^9, (D2,5)$	$3,64 \cdot 10^9, (D5)$	$3,71 \cdot 10^9 (D10)$
HB176	$145 \cdot 10^7$	$1,85 \cdot 10^9, (D2,5)$	$1,37 \cdot 10^9, (D5)$	$1,08 \cdot 10^9 (D10)$
HB103	$105 \cdot 10^7$	$1,11 \cdot 10^9, (D2,5)$	$1,03 \cdot 10^9, (D5)$	$1,07 \cdot 10^9 (D10)$

Для выполнения условий подобия в стандартных методах **число твердости** следует определять для одинаковой формы инструмента и **постоянного значения глубины индентирования** h_{st} Рис. 7б. Если используется разная форма инструмента, то необходимо выполнить соответствующий корректирующий расчет, удовлетворить условию (10.3) [4]. В этом случае аналитически можно создать подобие измерений разными инструментами, выполнить переход к другой шкале твердости или перевод значений числа твердости, используя универсальную физическую единицу твердости. О влиянии разной формы индентора, диапазона на число твердости, подробнее в работе [4]. Благодаря форме индентора усеченный конус в МСЖ подобие и условие (10.3) выполняются механически.

3. Физические свойства процесса измерения твердости методом Кальверта – Джонсона.

В работе [4] рассмотрен **физически корректный** метод измерения твердости, который создали Кальверт – Джонсон (1859г) [12]. Авторы МСЖ применили индентор в форме усеченного конуса, начальный диаметр контакта $d=1,25mm$, $X_{SVP}MSJ \approx 2,3 = const$. Эта форма индентора обеспечивает выполнение условия (10.3), $X_{SV}(h) \approx const$, см. диаграмму Рис.7а,б. Это свойство формы усеченного конуса, не материала. Таким образом, при измерении глубина h в МСЖ практически не влияла на число твердости. Формоизменение, образование поверхности, происходит приблизительно при $X_{SV} \approx const$. Эксперимент МСЖ завершается в точке h_{st} , объем $V_a(h_{st})$. В МСЖ не измеряли площадь и глубину индентирования. Измеряли необходимый вес гирь для процесса медленного вдавливания, на заданную глубину h_{st} . Время испытаний всегда 30 минут. Скорость перемещения индентора приблизительно постоянная, созданы условия близкие стационарной ползучести. Величина суммарного веса гирь с точностью до постоянного множителя равна работе

индентирования. Вытесненный объем и площадь контактной поверхности вмятины одинаковые для разного материала. Общий вес гирь для материала разной твердости различный. Но корневым, физическим показателем является удельная работа веса гирь. Вес *пропорционален удельной работе* (J/m^3) индентора.

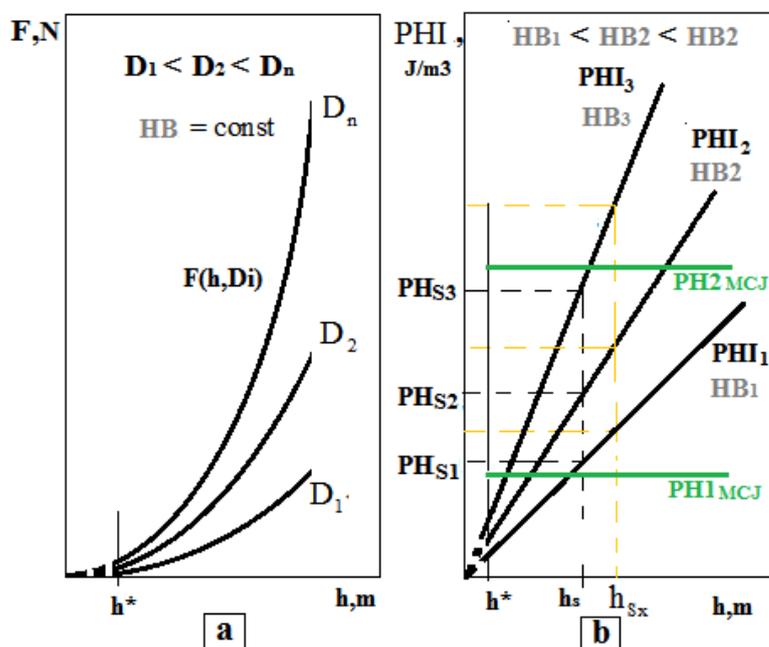


Рис.7. J Обобщенные диаграммы идеального ламинарного макро процесса СИ шаром Бринелля и конуса MCSJ: а) Функция $F_n(h, D_n)$ диаметр $D_1 < D_2 < D_n$, мера $HB_i = const$; б) функция $PHI_i(h, HB_i)$ и эталон PH_{Si} физической твердости каждой меры твердости HB_i , D - диаметр произвольный, $D > D_{min}$, $h < D$. Физические диаграммы СИ твердости PH_{1MCSJ}, PH_{2MCSJ} метод Кальверта и Джонсона, условный мягкий и твердый материал соответственно, $X_{SV}(h) = const$.

Таким образом, в MCSJ опосредованно измеряется плотность энергии индентирования ($\Delta A/\Delta V$) материала. Первая шкала твердости MCSJ была построена на основе сравнения физического энергетического критерия твердости. Разный материал – разная плотность энергии (обобщенная удельная мощность) формоизменения, разная твердость. Размерный эффект в MCSJ отсутствовал, первоначальная шкала была создана в единицах веса гирь, единая шкала твердости материалов от свинца до чугуна [12]. После этого авторы преобразовали энергетическую (весовую) шкалу твердости в безразмерную. Теоретического физического определения твердости по методу Кальверта – Джонсона не было. Анализ этого метода [4] показал, что в нем был интуитивно создан базовый физический принцип макро instrumented indentation. Метод применялся более сорока лет. В последующих методах измерения твердости шкала MCSJ поддерживалась эмпирически, искусственно. За этот период времени, по нашему предположению, сформировалось ошибочное мнение об отсутствии влияния на число твердости соотношения размеров активированного объема и площади контактной поверхности и др. В новых методах принцип подобия потерялся. Изменялись методы обработки данных механического акта, форма инструмента, алгоритмы измерения числа твердости (разные параметры геометрии, силы и др.). В результате закрепился не корректный эмпирический подход, в котором «искусственно» поддерживается первоначальная шкала твердости. Твердость (число) или

потенциал физической удельной мощности формоизменения в МСJ не зависит от глубины перемещения инструмента h Рис. 7b, зеленые линии. Форма индентора и правила измерения в МСJ позволили авторам сформировать, **базовую корректную физическую шкалу твердости**. Она стала основой для последующих исследований и т.п. Сам физический принцип МСJ в последствие был необоснованно искажен.

Обсуждение результатов.

В результате аналитического исследования свойств диаграммам СИ различных стандартных мер твердости найдена устойчивая характеристика твердого материала – физическая твердость $R_{HM}(V)$, Таблица 1. Главная компонента градиента физической твердости $R_{H_{st}}$, при условии физического подобия измерений, равна значению эмпирической твердости этого материала по шкале Бринелля Таблица 2. Некоторое расхождение значений твердости для разного подхода, результат применения приближенных методов аппроксимации и малого количества данных экспериментов. Вместе с тем аналитически показан устойчивый и основополагающий характер взаимосвязи функций физической твердости СИ и эмпирической твердости.

Из анализа результатов расчета потенциала физической твердости установлено, что это постоянная величина, объективная физическая характеристика для данного материала. В широком интервале значений h потенциал $R_{HM}(V)$ численно равен единственному значению компоненты потенциала физической твердости $R_{H_{st}}$, одновременно он численно равен эмпирической твердости H_B данного материала (стандартной меры) в условиях физического подобия. Величина потенциала $R_{HM}(V)$, не зависит от траектории процесса $F(h)$. Свойство экспериментально подтверждено для разной твердости материала, разных размеров сферы. Эти результаты подтвердили предположение, что при макро СИ стандартными методами ISO 14577-1:2002, существует функция состояния, термомеханический потенциал $U_p = A$ активированного объема материала (3), (6.1). Найдена объективная характеристика физико-механическое свойство твердости материала для ламинарного СИ.

В работах исследователей [13,14,15] для оценки твердости материала так же использован физический критерий удельной энергии кинетического индентирования. Получены экспериментальные результаты, в которых при одинаковом размере отпечатка практически нет размерного эффекта[15]. Авторы [13] предложили использовать показатель удельной энергии СИ для определения твердости материала. В этих исследованиях анализируется частный случай СИ, отсутствует теоретическое и физическое обобщение свойств данного процесса, нет физического анализа эмпирического метода измерения твердости. В то же время, этих работах экспериментально подтверждаются наши теоретические предположения и выводы о физической причине размерного эффекта.

Размерный эффект при измерении макротвердости.

На Рис. 7 а, показаны в обобщенном виде силовые диаграммы $F_n(h, D_n)$ с разной траекторией процесса, диаметр разный, постоянная твердость $HB = \text{const}$. На Рис. 8b показаны соответствующие им функции удельной мощности $PH_i(h, HB_i)$ три значения твердости $HB_1 < HB_2 < HB_3$, три диаметра сферы, использована формула (9.6). Анализ свойств функций $PH(h)$, (9.4) и функций эмпирической твердости $HI(h)$, (9.5) показал, число твердости для макро индентирования разным по форме **стандартными инденторами** следует находить только для одного установленного эталонного значения h_{st} . При увеличении глубины $h_{st} \rightarrow h_{sx}$, Рис. 8b, происходит пропорциональный рост значений эмпирического числа твердости, меняется масштаб шкалы твердости. Большому значению глубины h_{sx} , соответствует «растянутая» шкала твердости. Таким образом, число PH_i материала формально выросло. Шкала с новым масштабом твердости (глубина h_{sx}) показана желтым цветом. Твердость для каждой меры HB_i выросла на всех линиях диаграмм PH_i , аналогично изменится шкала эмпирических диаграмм $HI(h)$. При уменьшении h_{sx} шкала сжимается. В то же время величина физического потенциала твердости $PHM(V)$ данного материала не зависит от h в достаточно большом диапазоне CI , это постоянная физическая характеристика материала, данной формы индентора и достаточно большого интервала глубины h . Этим потенциал твердости $PHM(V)$ отличается от эмпирического или физического **числа твердости** полученного формулой (9.4). Для диаграммы CI построенной индентором MCJ физическая твердость PH_{MCJ} , компонента (9.6), практически он не зависит от глубины, она равняется потенциалу физической твердости $PHM(V) = PH_{MCJ} \approx \text{const}$.

В современных методах **CI** отсутствует критерий подобия **физических процессов при измерении числа твердости**, это главная причина появления размерного эффекта (SE). В эмпирических методах измерение числа твердости материалов выполняется при разной, не контролируемой величине $X_{SV}(h)$, т.е. в разных физических условиях. Для подобия эмпирических испытаний, сферой, пирамидой, конусом необходимо назначить и соблюдать эталон физико-механического процесса. Для сферы в макро CI это постоянная глубина h , не зависимо от диаметра. Индентор в форме усеченного конуса MCJ обеспечивал одинаковые физические условия в каждом акте индентирования механически. Если в стандартных методах **макро CI** применить индентор Калверта и Джонсона, он обеспечит физические условия подобия механически, по всему макро диапазону глубины, минимизирует SE, Рис. 7. Индентор MCJ генерирует почти одинаковую удельную площадь контактной поверхности $X_{SV}(h) \approx \text{const}$, Рис. 6. При условии $h > h^*$ перемещение индентора в MCJ мало влияет на значение макротвердости. Влияние участка релаксации в этом методе мало. В MCJ , на протяжении всего процесса вдавливания значение удельной затраченной энергии на формирование поверхности материала приближенно постоянное.

Применение разная глубина перемещения индентора h в одноактных эмпирических стандартных методах измерения числа **макротвердости** сферой и пирамидой приводит к нарушению физических условий подобия. В этом случае

измерение твердости сопровождается неконтролируемым переходом в другую шкалу или на другую физическую меру процесса. Число твердости эмпирического метода зависит от h на траектории физического процесса CI , то есть число твердости зависит от значения функции $RNI(h)$, (9.6). Эмпирическая твердость – значение функции компоненты удельной обобщенной мощности индентирования. **Размерный эффект** возникает при нарушении условия подобия формоизменения $X_{SV}(h) = const$.

Определения физической макротвердости кинетического индентирования.

Термомеханический потенциал индентированного материала $U_p = A(h)$ - функция состояния активированного объема.

Физическая макротвердость материала - $RNM(V, HB)$, размерность J/m^3 , **формулы** (7), (7,1), (7.2) различная форма представления, потенциала *удельной обобщенной мощности кинетического индентирования*, формоизменения активированного объема материала. $RNI_i(h, HB_i)$ - функция компоненты потенциала обобщенной удельной мощности индентирования сферой, компонента градиента потенциала так же это функция эмпирической твердости Рис.6, 7. Смысл и размерность эмпирической и физической твердости разный. Формальный перевод размерностей: $[J/m^3 = N/m^2 \times \frac{m}{m}]$. На

Рис.6b две диаграммы, для эмпирической $HI(h)$ и физической $RNI(h, HB, D_n)$ макро твердости, HB411, D5mm. На примере индентора Бринелля показан физический смысл и свойства **функции** макро эмпирической твердости CI , формула (9.6) и суть числа твердости поверхностного макро индентирования по стандарту ISO14577. Исследования показали, что методы измерения числа эмпирической макро твердости Бринелля, Роквелла, Виккерса и др. по стандарту ISO14577 некорректны с позиций физической теории твердости. В эмпирических методах нет условия физического подобия измерения числа твердости. Результатом нарушения физического подобия процессов является размерный эффект. В работе [4], на основе физического подхода, рассмотрены методы сопоставления значений твердости из разных методов. Используя зависимости физических методов анализа индентирования, аналитически построена виртуальная кривая $F(h)$ для пирамиды Виккерса и др. Индентирование моделируется как процесс выполненный сферой с переменным диаметром, для этого задана специальная функция $D(h)$ (динамичный шар Бринелля) и др.

Методы математического моделирования процесса CI , аналитически задана функция формы индентора от h , показали возможности применения физической теории для разработки универсальной программы сопоставления, перевода значений твердости разных стандартов и методов индентирования.

Нано и микро индентирование отличается по своей физической природе от процесса макро CI [4]. Активация и формоизменение материала происходят в очень малом объеме тела, нано плотность энергии выше на порядок и более чем в макро диапазоне [16]. В нано процессе своя физическая функция состояния активированного объема [4]. При расширенном диапазоне CI , например, для индентирования пирамидой Виккерса,

возникают последовательно два механизма формоизменения и преобразований. Вклад каждого из механизмов формоизменения тела меняется в процессе СИ. Основой теории процесса индентирования в любом диапазоне остается физическое понятие - удельная мощность, энергия процесса образования активированного объема и контактной поверхности СИ [4]. Оценка физической **нано-микро** твердости методом анализа СИ для острого инструмента конус, пирамида, микро и нано сфера, представляет отдельный метод. Физическая диаграмма твердости индентирования пирамидой, конусом выполняется при помощи собственной физической функции состояния, на этом основании было получено универсальное уравнение индентирования [4], это тема следующей статьи.

Универсальная физическая единица макро твердости.

Принимая во внимание совершенный теоретический фундамент, заложенный в методе Кальверта – Джонсона, перспективу применения физического анализа результатов СИ, предлагаем применить в стандарте универсальную физическую единицу макро твердости:

$$1.CJ = 1 \cdot 10^7 J/m^3$$

1.CJ - один «сај».

Твердость стандартной меры 103НВ приблизительно равна 100CJ физической твердости. Физическая макротвердость конструкционных материалов находится в интервале 1-1000CJ, не зависит от формы индентора. Функция, шкала и значения физической твердости аналитически связаны с функцией и числом эмпирической твердости, для разных методов индентирования. Физические и эмпирические методы могут действовать в новом стандарте параллельно, до отмены эмпирических методов.

Выводы.

1. Теоретически обоснованы физические характеристики экспериментального процесса кинетического макро индентирования материала: функция и число физической твердости, определен физический смысл и размерность твердости.
2. Определена функция состояния активированного объема материала для кинетического (инструментального) макро индентирования сферой.
3. На основе аналитического анализа стандартной кинетической силовой диаграммы разработаны методы определения значения физического потенциала макротвердости материала, функции физической кинетической твердости макро индентирования. В методе отсутствует размерный эффект. Универсальные физические характеристики твердости имеют ряд важных преимуществ и могут заменить эмпирические стандартные методы измерения твердости.
4. Показан физический смысл стандартного эмпирического числа макротвердости материала и причина размерного эффекта в методах эмпирическом макро индентировании.
5. Установлена аналитическая связь значений эмпирической и физической твердости кинетического макро индентирования материала. Сформулированы принципы,

критерии подобия и аналитический метод сравнения числа твердости материалов для разных размеров, формы инструмента, в диапазоне макро индентирования.

6. Полученные результаты представляют основу для разработки дополнения к действующему стандарту ISO 14577 и создания общей физической теории твердости конструкционных материалов в разных диапазонах.

References.

1. Shtyrov N. Physical Methods and Parameters for Assessing the Strength, Fatigue, Durability and Damage to a Structural Material. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*. № 9 (2019) , 84-91
2. В.И. Мощенок Современные методы определения твёрдости. LAP Lambert. 2019. - 382с.
3. Новиков И.И. Термодинамика. М. Машиностроение. 1984. -592с.
4. Н.А.Штырёв. Физическая теория прочности. Гл.7 . Методы определения физических структурно-энергетических молярных параметров конструкционных материалов. //energydurability.com, 2020.
5. Н.А.Штырёв. Деформирование и разрушение твердых тел с позиций кинетической структурно-энергетической теории прочности. // *Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій. Збірник наукових праць 5-ї Міжнародної конференції під заг. ред. В.В. Панасюка. 2014, Львів. ФМІ, Україна, с 63-70.*
6. Н.А.Штырёв. Деформирование и разрушение твердых тел при нестационарных нагрузках с позиций кинетической структурно-энергетической теории прочности. «Вибрации в технике и технологиях» ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев, №1(77) 2015г, с.55-61.
7. Ю.Б.Румер, М.Ш.Рывкин. Термодинамика статистическая физика и кинетика, «Наука», 1977, 552с.
8. Дзюба В.С. Прочность и деформирование армированных пластиков с учетом механической повреждаемости. Сообщение 1. Уравнения состояния армированных пластиков с учетом механической повреждаемости и физико-химических превращений. *Проблемы прочности.1979г. №10 с. 38-42 .*
9. И.Н.Бронштейн, К.А.Семендяев Справочник по математике. «Наука», 1965 , 608с.
10. ISO 14577-1:2002. Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Test method F.Crace Calvert, Richard Johnson. On the hardness of metals and alloys. *JFI, volume 67, issue 3, march 1859, pages198-203.*
11. О.А. Каток, Н.П. Рудницкий, В.В. Харченко. Определение твердости по Бринеллю методом инструментированного индентирования. *ХНАДУ Вест. 54.2011.с.23-26.*
12. F. Crace Calvert, Richard Johnson. On the hardness of metals and alloys. *JFI, volume 67, issue 3, march 1859, pages198-203.*
13. P.M. Ogar et al. Application of the curves of kinematic indentation by a sphere to determine materials' mechanical properties. P.M. Ogara, V.A. Tarasovb, A.V. Turchenkos, I.B. Fedorov. *Systems. Methods. Technologies. 2013 № 1 (17) p. 41-47*
14. Мильман Ю.В., Гринкевич К.Э., Мордель П.В. Энергетическая концепция твердости при инструментальном индентировании // *Деформация и разрушение материалов. 2013. № 1. С. 2-9.*
15. Ю.В. Мильман, А.А. Голубенко, С.Н. Дуб. Определение нанотвердости при фиксированном размере отпечатка твердости для устранения масштабного фактора. ISSN 1562-6016. *ВАНТ. 2015. №2(96).*
16. А.Л. Волинский. Зависит ли прочность твердого тела от его размеров. *Природа, №9, 2007г, 14-19с.*