

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

*Shtyrov Nikolay*

*Private Research and production Company «LYU». Nikolayev, Ukraine, +380675102044,*

*E-mail: [nasht@ukr.net](mailto:nasht@ukr.net)*

## **Abstract:**

Три направления развития кинетических методов индентирования. Физико-энергетический анализ диаграммы сил вдавливания по ISO 14577. Физическая теория и универсальный критерий макротвердости материала. Модель физического процесса, термомеханический потенциал, функция состояния кинетического процесса макроиндентирования. Метод определения физической функции и единицы измерения кинетической макротвердости материала. Соотношение значений эмпирической (нормативной) и физической макротвердости материала. Физическая причина появления размерного эффекта в эмпирических методах индентирования. Принцип определения нормативного значения физической макротвердости.

**Key words:** обзор, физическая теория кинетического индентирования, метод определения функции и числа физической макротвердости, соотношение эмпирической и физической макротвердости материала.

*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 физической 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]. Обсудим характерные недостатки эмпирических методов индентирования, использует при этом выводы из монографии профессора В.И. Мощенок [1] и результаты собственных исследований.

Рассмотрим расчет числа твердости методом Бринелля, в рамках стандарта ISO 14577-1:2002 [4]. В методе существует более тридцати шкал для измерения твердости, число твердости зависит от усилия, но эта зависимость не имеет системного характера. Американский стандарт предлагает использовать дополнительные шкалы, тем самым дополнительно усложняет метод. Отсутствует обоснованный ясный критерий выбора шкалы для измерений, полученные эмпирические значения систематизируют интуитивным опытным путем, твердость зависит от диаметра индентора. 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 нагрузок (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].

### 1.3 Макро instrumented indentation (кинетическое индетирование).

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 **RTT**, 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*.

#### 1.4 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 ( $J/m^3$ ) 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].

#### 1.5 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.

#### *1.6 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:  $HV = 3\sigma_b$ , где  $\sigma_b$  - 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.

### *1.7 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 индетирования 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



Обозначения Рис.1: М – материал;  $I_0$  - сферический индентор Бринелля,  $I_v$  – пирамида Виккерса; Нижний индекс:  $o$  – сфера,  $v$  – пирамида.  $F_o$  и  $F_v$  - 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  $M$ , 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 квазижидком 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.

## 2.2 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,  $\hat{S}_m$  – энтропия.

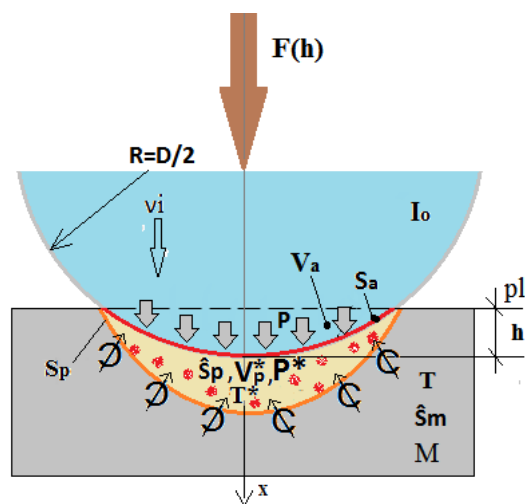


Рис.2 Физическая модель активированного объема материала  $V_p^*$  как термомеханической системы.

Предполагаем, что процесс индентирования 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

$\widehat{S}_p^*$ . 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 завершён переход из твердой фазы в квазизидкое 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 квазизидкости  $P_p^* = \sigma_{sh}^* = \text{const}$ . 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 СИ 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  $v_i$ , происходит непрерывный, стабильный, ламинарный процесс перемещения, формоизменения, структурных преобразований и роста объема  $V_p(h)$  с параметрами  $P_p^*$ ,  $\widehat{S}_p^*$ ,  $T_p^*$ . 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 СИ. Это некоторая монотонная возрастающая функция TMS.

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

### 2.3 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:  $P$ ,  $T$ ,  $\widehat{S}$ . 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:

$$U = Q - A, \quad J, \quad (1)$$

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

$$A = \int PdV, \quad Q = \int Td\hat{S}. \quad T = \text{const}, \quad P = \text{const}. \quad (24)$$

Из (1) и (2) с учетом принятых обозначений для активированного объема  $V_p(h)$ :

$$U_p = T_p^* \hat{S}_p^* + P_p^* V_p^*, \quad (35)$$

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

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 (1) 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.

2.4 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  $U_p$  (4), это предел отношения приращения энергии и приращения активированного объема:

$$\frac{dU_p}{dV} = \frac{d(T_p^* \widehat{S}_p^* + P_p^* V_p^*)}{dV}, J/m^3. T^* = \text{const}, P^* = \text{const}. \quad (46)$$

Обозначим этот объемный дифференциал приращения энергии:

$$PHM(V_p) = \frac{dU_p}{dV}, J/m^3 \quad (56a)$$

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 (6a) применить термин *обобщенная удельная мощность изменения энергии в единице* активированного объема. Сокращенно (5),  $PHM(V_p)$  - *потенциал удельный обобщенной мощности макро индентирования*. В этом случае, объем независимая переменная,  $V_p = V$ . В результате мы получили (5) обобщенный изохорно – изобарно - изотермический *термодинамический* потенциал обобщенной мощности активированного объема твердого тела в результате макро индентирования. Согласно условию (4) 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:

$$U_p = P_p V_p = A(V) \quad (6.)$$

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

$$A(V) = A(h) = \int_0^{h_0} F(h) dh \quad (7 \ 6.2), \quad A' = \partial A / \partial h = F(h). \quad (8 \ 6.3),$$

$$U_p = \int_0^{h_0} F(h) dh. \quad (9 \ 6.4)$$

Далее полагаем  $V_p = V_a$ , для простоты записи нижний индекс опускаем  $V_p = V_a = V$ . Используя (2), (4), (6), получим объемный дифференциал, назовем его **потенциал удельный обобщенной мощности макро индентирования материала**:

$$\text{PHM}(V) = \frac{dA(V)}{dV}, \text{ J/m}^3 \quad (10.7)$$

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

$$\text{PHM}(V) = \text{grad}A = \frac{\partial A}{\partial V_x} + \frac{\partial A}{\partial V_y} + \frac{\partial A}{\partial V_z} = \text{PHI}_x(h) + 2\text{PHI}_z(h) \quad (11.7.1)$$

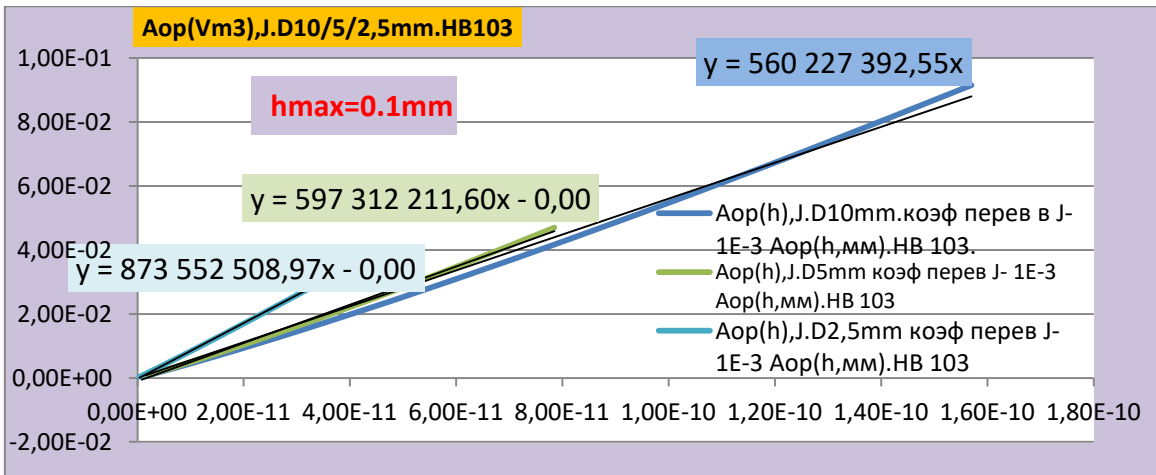
Где,  $\text{grad}A$  - градиент  $A(V)$  на поверхности  $S_a$  активированного объема  $V(h)$ ,

$$\text{PHI}_x(h) = \frac{\partial A}{\partial V_x}, \text{PHI}_y(h) = \frac{\partial A}{\partial V_y}, \text{PHI}_z(h) = \frac{\partial A}{\partial V_z}, \text{PHI}_y(h) = \text{PHI}_z(h), \text{PHI}_{x,y,z}(h) - \text{компоненты}$$

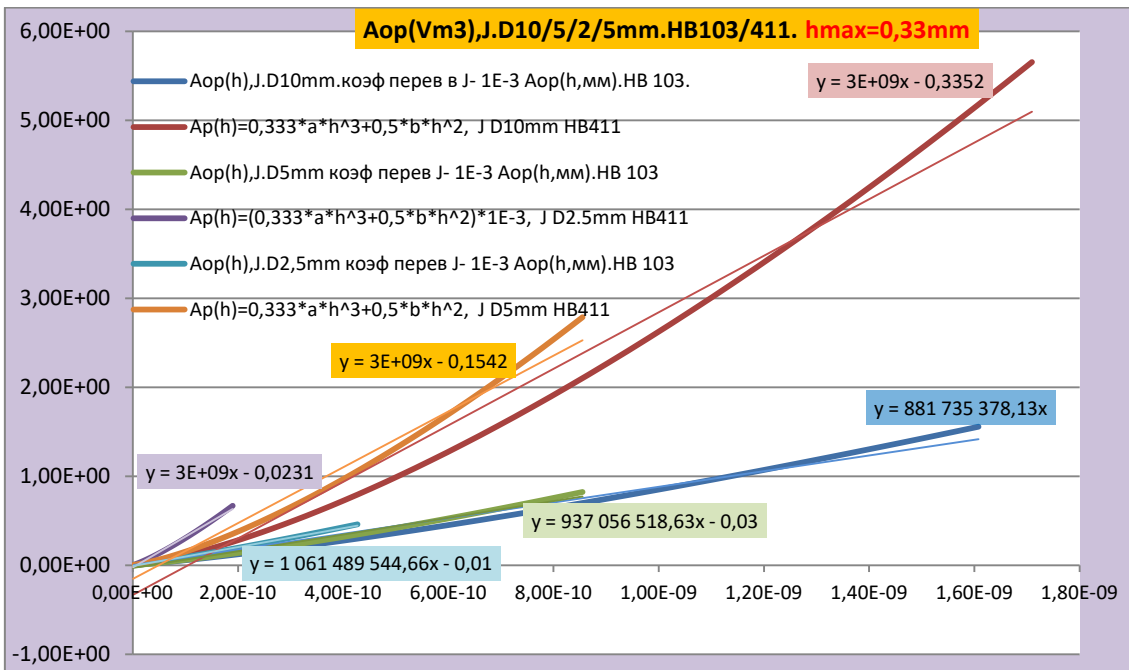
градиента потенциала  $A$  по осям декартовых координат. Применим физическое определение к потенциалу удельной мощности  $\text{PHM}(V)$ , (11) - **градиент плотности поля энергии активированного объема в процессе СИ на граничной поверхности  $S_a$** . Потенциал  $\text{PHM}(V)$  так же можно рассматривать 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.

### 2.5 Экспериментальные свойства потенциала удельной обобщенной мощности индентирования. Физический эталон макротвердости.

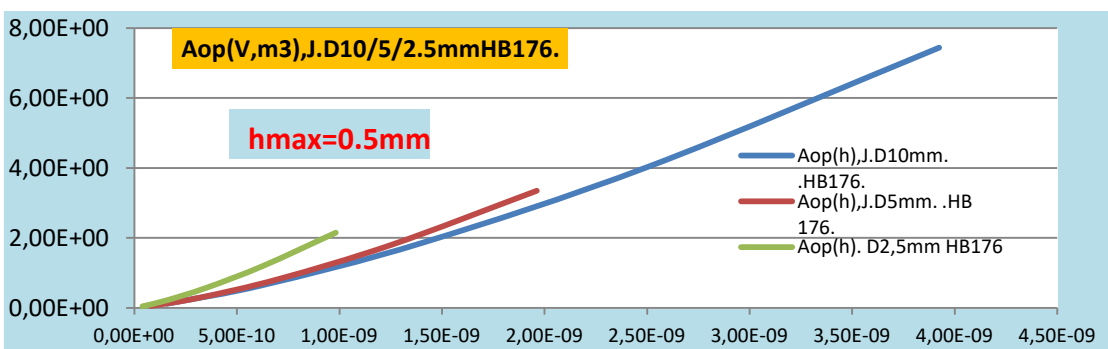
В работе [1], на основе анализа экспериментальных диаграмм  $F(h)$  [3], кинетического макро индентирования сферой разного диаметра стандартных образцовых мер различной твердости, получены функции физического термомеханического потенциала  $A(V, m^3)$ . На Рис.3 показаны функции  $A(V, m^3)$ , интеграл функции  $F(h)$ . Исследованы стандартные меры твердости, диаметр сферы  $D10/5/2,5\text{mm}$  [2]: а) Меры НВ103/411, Диапазон измерений  $h=0,1-0,33\text{mm}$ ; Рис.3b Мера НВ176. Диапазон  $h_{\text{max}}=0,5-5,0\text{mm}$ . Получены уравнения линейного тренда аппроксимации каждой функции (обозначены  $y = A'_x$ ). Для этого использован Excel-2007, построены линейные тренды  $A(V, m^3)$ , черная линия (а, с), цветная линия (а2, b1).



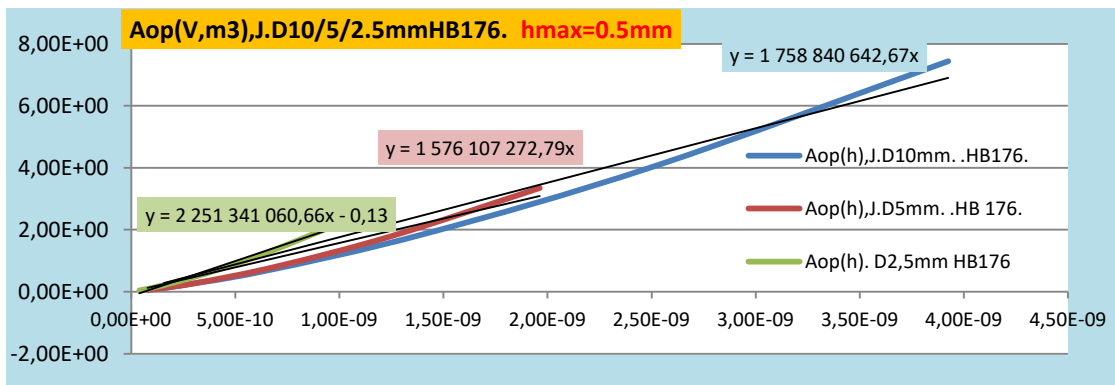
a.



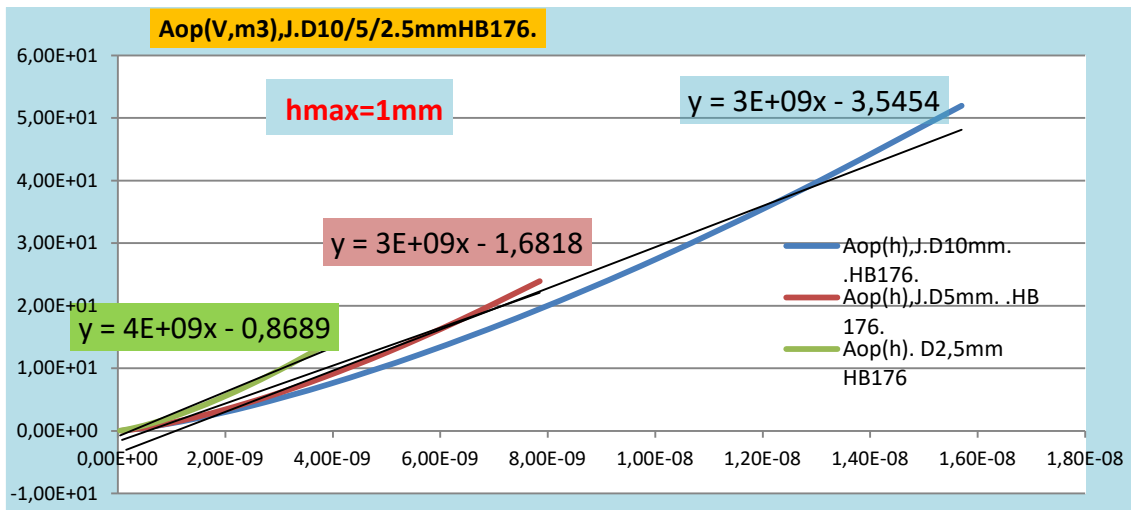
b.



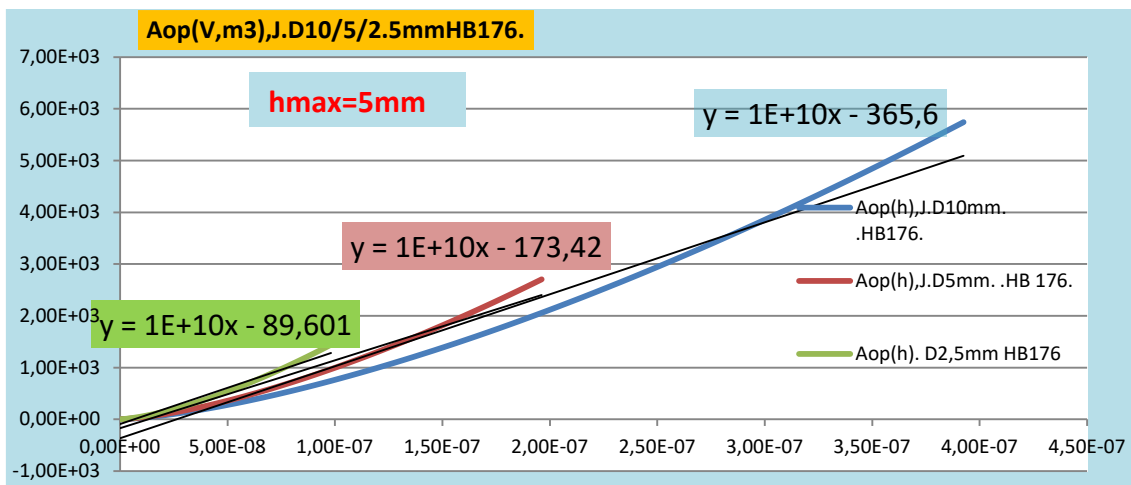
c.



d.



e.



f.

**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].

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 HB103/176/411, 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  $V_a$ . Другая формулировка зависимости (7.3): объемный потенциал активированного объема макро ламинарного индентирования  $A(V)$ , равен произведению потенциала удельный обобщенной мощности индентирования (7)  $PHM(HB)$  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. Crace Calvert, Richard Johnson. On the hardness of metals and alloys. JFI, volume 67, issue 3, march 1859, pages198-203.
3. В.И. Мошенок 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. Turchenkos, 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. ВАНТ. 2015. №2(96).