

# Определение физических параметров твердости и прочности материала по силовой диаграмме нано-микро индентирования.

*Shtyrov Nikolay\**

*Private Research and production Company «LYU». Nikolayev, Ukraine, 54020, PO  
Box 86, Ukraine , +380675102044, Директор Shtyrov Nikolay \* E-mail:  
[nasht@ukr.net](mailto:nasht@ukr.net)*

**Особенности.** Деформируемое твердое тело представлено как физическая макроскопическая термомеханическая реологическая система, образованная волнами - квазичастицами. Теоретически обоснованы зависимости и универсальные физические параметры прочности материалов, на их основе разработан алгоритм и компьютерная методика расчета нормативных механических показателей: предела пропорциональности, предела прочности, усталости и др. Методика аналитической оценки универсальных физических параметров прочности материала (граничные условия уравнения). Метод основан на физическом анализе результатов стандартных испытаний на растяжение до разрушения ISO6892-84, анализе данных кинетического вдавливания ISO 14577-1: 2002.

## **Аннотация**

Представлены результаты аналитического исследования стандартной силовой кинетической диаграммы вдавливания методами физической структурно-энергетической теории прочности твердых тел. Методы определения универсальной физической кинетической макро, нано-микро твердости материала. Физическая модель процесса необратимых преобразований энергии нано-микро структуры материала. Уравнение и структурно-физический параметр нано-микро твердости кинетического индентирования материала. Аналитические методы расчета прочности, долговечности, поврежденности, пластичности материала используя универсальные структурно-энергетические молярные физические параметры. Взаимосвязь молярного параметра прочности и структурно-физического параметра нано-микро твердости материала. Перспективы применения физического метода анализа нано-микро индентирования и структурно-энергетической теории прочности.

**Ключевые слова:** теория, методы расчета, физические параметры прочности, долговечности, твердости, индентирование.

## **Цель работы.**

Ознакомление с тезисами физической структурно-энергетической теории прочности. Пример расчета параметров прочности, долговечности, поврежденности, используя молярные физические параметры материала. Результаты аналитического анализа силовой диаграммы макро и нано-микро кинетического индентирования материала методами физической теории. Эмпирическая и физическая твердость материала. Структурно-физический параметр материала в уравнении нано-микро твердости, свойства. Соотношение параметра физической твердости нано-микро индентирования и

структурно-энергетического молярного параметра прочности и долговечности материала. Перспектива применения и развития физического подхода.

## 1. Физическая теория прочности.

В физической структурно-энергетической теории прочности (далее кратко SET) [1,2,3,4] деформированное твердое тело (DS – deform solids) рассматривается как физическая среда, макроскопическая система, которая характеризуется механическими, термодинамическими и статистическими корпускулярно-волновыми свойствами и параметрами: молярная энергия  $W_L$ , молярный термодинамический потенциал  $G$  молярный объем  $Sh$  и т.д. Рассмотрим основные понятия теории.

Молярная энергия  $W_L, J/mol$  – физическая характеристика макроскопического множества элементарных состояний дальнего и ближнего корпускулярно-волнового взаимодействия структурных единиц, которые образуют объем DS различной природы, в присутствии поля напряжений и температуры. Элементарное состояние молярной энергии рассматривается как корпускулярно-волновой процесс взаимодействия CE, происходящий в малом объеме квазиравновесной системе DS. Процесс взаимодействия это непрерывное движение и преобразование нано-микро потоков CW энергии между элементарно малыми объемами DS. В каждом элементарном молярном объеме происходит непрерывный колебательный процесс, преобразования кинетической CW энергии в потенциальную CW энергию и т.д. Элементарной физической мерой энергии квазиравновесного объемного процесса (элементарный алгоритм) принята характеристическая флуктуация (CFL) корпускулярно-волнового взаимодействия. Флуктуация CFL может иметь обратимый и необратимый характер. Средние физические параметры CFL за некоторый элементарный характерный период времени равны средним термомеханическим макро параметрам квазиравновесной макросистемы DS. Таким образом, DS рассматривается как физическая среда, макроскопическая система, образованная совокупностью CFL. Они взаимосвязаны внутренними процессами обмена CW энергией. Одновременно мы рассматриваем обычные механические, физические, термодинамические и др. характеристики DS. Упругая энергия в единице объема деформированного тела  $W_\sigma$  и молярная энергия  $W_L, J/mol$ , объема, связаны зависимостью:

$$W_L = W_\sigma \cdot Sh, \quad \text{Где, } Sh, m^3/mol - \text{ молярный объем CFL.}$$

Молярные свойства ДТТ – новая физическая мерность состояния материала как макроскопической квазиравновесной термомеханической системы, наряду с привычными механическими критериями. Это дополнительные объективные реологические, кинетические и др. физические характеристики состояния необратимых и обратимых внутренних процессов в DS. Молярные структурно-энергетические характеристики позволяют оценить время до разрушения (спонтанное, хрупкое), скорость деградации структурно-энергетического состояния, скорость и абсолютное значение необратимых деформаций. Можно оценить скорость изменения площади внешней макро и внутренней микроскопической поверхности DS, определить количество элементарных дефектов (дислокации, вакансии, микротрещины) в единице объема и др. Уравнения теории содержат в явном виде время процесса, температуру, напряжения, начальные структурно-энергетические молярные параметры материала и др. Таким образом, используя физические методы, мы рассматриваем физическое деформированное твердое тело. Тело, материал рассматриваем как совокупность элементарных физических CW состояний.

В волновой структурно-энергетической кинетической теории прочности моль объективная физическая корпускулярно-волновая *энергетическая характеристика*  $DS$ . Молярный объем деформированного твердого тела макро характеристика, обозначается  $Sh(\sigma, t), m^3 / mol$ . Корневой молярный объем твердого тел  $\gamma, m^3 / mol$  характеристика условного предельного структурно-энергетического состояния. Молярный объем образован совокупностью элементарных состояний CFL в количестве равном  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  un. / mol (число Авогадро). Физический моль – энергетическая статистическая квазиравновесная система, состоящая из макроскопического количества элементарных неравновесных состояний [5]. Обычно моль рассматривается как множество *структурных единиц среды обладающих массой* (атом, молекула, ион и др.). Мы рассматриваем периодические во времени и пространстве *элементарные физические состояния молярной энергии*, результат взаимодействия волн-квазичастиц энергии в макросистеме. В работе [6] изложены основные положения физической теории. Каждый элементарный объем содержит CFL, представляет нано микроскопическую неравновесную CW энергетическую систему. В этой элементарной системе происходит непрерывный процесс колебаний (преобразований) корпускулярно-волновой энергии DS (далее кратко CWE). В элементарном молярном объеме происходит процесс, встречного движения CW энергии. Кинетическая энергия входящего потока волн-квазичастиц преобразуется в потенциальную энергию объема, потенциальная энергия создает исходящий из объема поток кинетической CW энергии. Элементарную систему в этом элементарном молярном объеме, можно представить как диполь образованный стоком и источником CWE [6]. Диполь имеет собственные микро параметры, связанные с макро физическими параметрами: температура -  $T$ , истинные напряжения -  $\sigma$ , плотность упругой энергии -  $W_\sigma, J / m^3$ , молярная плотность энергии объема (молярная энергия) -  $W_L, J / mol$  и др. параметрами термомеханической равновесной системы твердого тела и механической или иной нагрузки.

В теории предполагается, что CFL результат объемного ассоциированного ближнего и дальнего одновременного взаимодействия, посредством волн-квазичастиц де Бройля, всей совокупности элементарных молярных объемов тела любой природы. В DS присутствуют микроскопические волны CWE с разной частотой, длиной волны, энергией, вектором и др. Мы используем в своих формулах упрощенное представление, более точная модель, предположительно, это корпускулярно вихревой трехмерный волновой процесс движения CWE. Этот процесс формирует поля температуры и напряжений. Наряду с обычными геометрическими и механическими параметрами, относительный объем (линейный размер), мы рассматриваем свойства и параметры физического объема.

Физическая теория располагает уравнениями, зависимостями для решения задач определения пластических деформаций, скорости разрушения, условий достижения предельного состояния материала при переменных нагрузках механической и иной физической природы, без привлечения предельных стандартных механических характеристик [2,3,4]. В SETS в расчетах используются новые физические методы и параметры. Уравнения теории позволяют учитывать историю, реологию нагрузки, влияние различных переменных факторов на прочность, пластичность и долговечность (радиация, температура, водородный потенциал, электрический ток и др.). Влияние этих

факторов (нагрузок) можно аналитически представить как внешние физические корпускулярно-волновые энергетические процессы, которые определенным образом суммируются с собственными физическими молярными структурно-энергетическими свойствами и параметрами TMS. В то же время, молярные параметры материала и зависимости SETS позволяют аналитически определить каждую из известных стандартных механических характеристик, для этого выполняем виртуальные механические испытания по стандарту[7].

Любой физико-механический и др. фактор, влияющий на долговечность и прочность материала, воздействует на нано-микро структуру потоков микроскопической СВ энергии твердого тела. Взаимодействие происходит во времени и пространстве, процесс рассматривается в физической теории как нагрузка. Различная нагрузка может быть представлена эквивалентной СВ энергией, через молярные параметры. Поле напряжений (макроанизотропное) поле температуры (макро изотропное) рассматриваются как физические явления единой СВ природы. Следовательно, физической нагрузкой считаем температурный, электрический, радиационный и др. поток энергии нагрузки, выраженный через СВ молярные параметры. Физическая прочность в SET может быть механической, радиационной и т.п. Прочность материала рассматривается как процесс или способность во времени передавать и преобразовывать СВ энергию в некотором конечном объеме DS, сохраняя собственные заданные механические, физические и др. параметры в заданных пределах. В наших аналитических методах используются простейшие (инженерные) модели физической прочности, в условиях изотропии, одноосных механических напряжений и однородных полей температуры и др. Более точная модель, предположительно, это трехмерный, анизотропный, векторный, корпускулярно вихревой волновой процесс движения CWE. В то же время, физическая теория заменила более ста сложных и неоднозначных феноменологических теорий прочности, предложила единую более простую теоретическую основу и новые методы решения прикладных задач механики разрушения и материаловедения.

В SET предложены новые обобщенные универсальные физические параметры состояния DS, инре характеристики (inre – на деле, лат.), производные этих величин, получены их функции [1]. Аналитическая связь физических молярных параметров и механических параметров теории упругости, в простом случае, показана формулой (1).

Рассмотрим DS как гетерогенную однофазную (трехмерная фаза) однокомпонентную термодинамическую систему в квазиравновесном состоянии. Пусть задана функция главных напряжений  $\sigma_1(t)$  по одной компоненте тензора  $\sigma_1(t) = \sigma(t)$ ,  $|\sigma| > 0$ , Pa. В этом случае, состояние DS можем характеризовать обобщенными физическими характеристиками, в частности  $Sh(\sigma, t)$ ,  $m^3 / mol$  - молярный объем квазичастиц прочности. В молярном объеме DS за некоторый элементарный характерный период времени  $\tau_0$ , происходят характеристические флуктуации CFL, их количество равно  $N_A = 2.23 \cdot 10^{22}$ ,  $un / mol$ , число Авогадро. CFL - физическая мера энергии волн-квазичастиц де Бройля, которые взаимодействуют за указанный период в элементарном молярном объеме, в условиях термомеханического квазиравновесия всей макросистемы [6].

$$W_L = W_\sigma \cdot Sh, \text{ J/mol}, \quad (1)$$

Где,  $W_L(\sigma, t)$  - молярная энергия, функция состояния DS,  $W_\sigma = \frac{\sigma^2}{2E}$ , J/m<sup>3</sup>, E – модуль упругости. Таким образом, твердое деформированное тело рассматриваем как объем из квазичастиц CFL с молярной плотностью энергии соответствующей упругой энергии данного деформированного тела. В зависимости (1) видим дуализм корпускулярно-волнового подхода, аналогичный метод использован в теоретическом обосновании волновой функции Шредингера. В условиях термомеханического квазиравновесия, имеет место аналитическая связь внутренней энергии твердого тела как макроскопической системы элементарных частиц массы с одной стороны и с другой стороны это энергия совокупности вихрей волн квазичастиц CFL в объеме данного тела.

Зависимость (2), представляет структурно-энергетический закон состояния деформированного твердого тела, он получен на основании обобщения и анализа результатов экспериментальных исследований долговечности различных твердых тел в условиях квазиравновесного состояния и широком диапазоне значений  $T = \text{const}$ ,  $\sigma = \text{const}$  [2,6]. Для одноосного растяжения:

$$\sigma \cdot Sh = Gr \quad (2)$$

Где,  $Gr(\sigma, T, U_o, Gr_o, t)$  - функция структурно-энергетического состояния материала, отражает необратимые нано структурные изменения твердого тела с течением времени под влиянием механической, тепловой и др. нагрузкой [6,7]. Для одноосного растяжения

$$\sigma \cdot \gamma = W_L \quad (2.1)$$

Где,  $\gamma = Sh(t, \sigma = E)$ , m<sup>3</sup> / mol - корневой молярный объем или структурная функция материала. Начальное значение  $\gamma_o = Sh(t = 0, \sigma = E)$  равно структурному коэффициенту Журкова [6,7]. Это физико-механическая характеристика начального состояния нано-микро структуры твердого тела. Формула связи механических и физических параметров (молярных характеристик) материала:

$$Gr(t) = 0.5E \cdot \gamma_r(t), \quad Gr_o = 0.5E\gamma_{r_o}, \quad (2.2)$$

Начальное значение  $\gamma_o$ , для чистых металлов, некоторых твердых тел определяется по методике Журкова [8,9]. Для конструкционных материалов,  $Gr_o$  определяется по реологической диаграмме одноосного растяжения материала, до состояния разрушения [3,7].

## 2. Основное уравнение.

В SET было получено физическое уравнение для расчета долговечности при нестационарных и сложных нагрузках [4,6]. Уравнение было получено автором теории в результате обобщения и анализа эмпирических зависимостей и основополагающих экспериментов кинетической концепции прочности [8,9]. Формулы концепции получены для условия  $\sigma = \text{const}$  [9]. Дифференциальное уравнение (3) записано для произвольной

заданной функции истинных переменных напряжений  $\sigma(t)$ , однокомпонентного структурно однородного и стабильного материала.

$$\frac{\sigma(t)dy}{dt} = \frac{RT}{\tau_0} \exp\left(\frac{\gamma_0 \sigma(t) - U_0}{RT}\right), \quad \text{j/s} \cdot \text{mol}, \quad (3)$$

Граничные начальные условия:  $U_0, \gamma_0(0)$ . Физическое условие хрупкого разрушения для заданных напряжений растяжения  $\sigma(t)$ :

$$U_0 - \gamma(t_*) \sigma(t_*) = 0, \quad T = \text{const}.$$

Решение уравнения позволяет находить значение функции корневого молярного объема -  $\gamma(t, \sigma)$ , структурно-энергетический потенциал  $Gr(t)$ , время и значения физико-механических параметров в момент хрупкого спонтанного разрушения  $t_*$  или заданного предельного состояния. Физический смысл и свойства главных параметров и величин  $U_0, \gamma_0, \gamma(t)$  исследованы в работах [1,2,6].

### 3. Применение физического метода в расчетах прочности и долговечности для переменных напряжений и температуры.

В работе [7] показан аналитический метод использования физической теории прочности в расчетах прочности и усталости углеродистой стали. Используя уравнение (3), формулы теории, установлена связь между физическими структурно-энергетическими параметрами и стандартными механическими предельными показателями прочности и деформационными характеристиками материала. Для определения начальных физических параметров материала (граничных условий уравнения) был использован анализ свойств экспериментальных реологических функций напряжений  $\sigma(t)$  и деформаций  $\varepsilon(t)$ , полученных на малой скорости деформирования стали при растяжении до разрушения. Используя эти параметры, уравнение (3) и формулы теории выполнена оценка начальных структурно-энергетических физических параметров прочности стали 45. Начальный структурный параметр  $\gamma_0 = \gamma(t_{02}) = 1,23 \div 1,28 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{mol}$ . Энергия активации разрушения до предела текучести -  $U_{01} = 1,38 \cdot 10^5 \text{ j/mol}$ , до предела прочности -  $U_{02} = 2,05 \cdot 10^5 \text{ j/mol}$ .

Используя уравнение (4) и полученные начальные молярные физические параметры стали 45,  $\gamma_0, U_0$ , аналитически выполнены усталостные испытания материала, определен предел выносливости  $\sigma_{-1p}$  углеродистой стали 45 [7]. Характеристики углеродистой стали 45, в состоянии поставки: предел прочности  $\sigma_B = 748 \text{ МПа}$ , истинный предел прочности  $S_* = 1173 \text{ МПа}$ ;  $\sigma_{02} = 412 \cdot 10^6 \text{ Па}$ , предел выносливости (ГОСТ 1497-84)  $\sigma_{-1p} = 190-250 \text{ МПа}$  (пульсации растяжения). На Рис.1 показаны результаты теоретической оценки параметров усталости, для заданных различных циклических напряжений, температурных режимов. Используются численные методы и наши программы решения уравнения (3). Выполнена оценка влияния частоты нагрузки, температуры на долговечность, предел выносливости. Так же аналитическими методами определены другие механические параметры прочности стали 45. Результаты расчетов согласуются со справочными характеристиками материала.

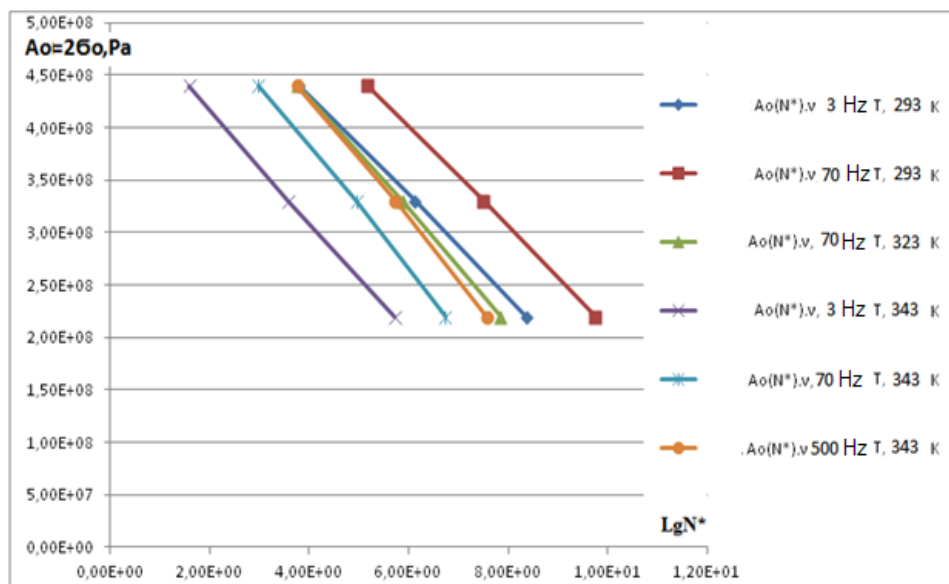


Fig.1. The dependence of the amplitude of the magnitude of the cyclic tensile stress  $A_0$  on the number of cycles to the destruction of the material  $N_*$ . 1. Frequencies 3, 70, 500 Hz. Temperature: 293 (20), 323 (50), 343 (70), Celsius temperature in brackets. Form of uniaxial tension cycle stress:  $\sigma(t) = \sigma_0(1.001 - \cos B_s t)$ . Material steel 45.

Разработана программа расчета измененных механических стандартных характеристик поврежденного материала, подверженного действию произвольных по форме заданных во времени переменных напряжений и некоторых др. факторов.

Таким образом, располагая функцией нагрузки в истинных напряжениях  $\sigma(t)$ , данными о температуре тела  $T(t)$ , начальными физическими параметрами материала  $\gamma_0$ ,  $U_0$ , аналитическими методами физической теории можно установить значения накопленной пластической деформации, поврежденность, прогнозируемое время до разрушения, влияние формы цикла на скорость накопления повреждений и определить фактические механические стандартные параметры прочности для поврежденного материала и др.

Анализ проделанной работы показал, физический подход предложил новые удобные и информативные методы решения инженерных и научных задач механики прочности и разрушения деформированного твердого тела. Полученные результаты подтвердили правомерность физической корпускулярно-волновой модели прочности материалов. Одновременно проделанная работа показала, что определение главных физических параметров материала  $\gamma_0$ ,  $U_0$  по реологической диаграмме растяжения образца, трудоемкая и дорогостоящая, иногда недоступная процедура. Поэтому была поставлена следующая задача, разработать инженерный метод определения универсальных молярных физических параметров, используя результаты современных методов кинетического индентирования материала по стандарту ISO 14577.

#### 4. Энергетическая мера, критерий подобия, универсальная шкала и единица измерения физической твердости материала.

Используя методы физической структурно-энергетической теории прочности, нами был выполнен анализ главных методов определения твердости разных материалов. Исследованы свойства силовой диаграммы, энергетических и геометрических параметров кинетического индентирования материала по стандарту ISO 14577 [10]. Основная часть рассмотренного экспериментального и методологического материала из

монографии и статей профессора *КННАНУ* В. Мощенок [11,12]. Объединенный анализ позволил сделать окончательный вывод, что существующие стандартные методы одноактного и кинетического индентирования, используют в своей основе эмпирический подход, в котором отсутствует физический принцип определения твердости материала. В основу эмпирического числа твердости исторически, в разных версиях, положена величина отношения  $F/S$ , где  $F$ - некоторое значение усилия, действующего на некоторую условную площадь  $S$  контакта и условный объем деформированного материала. По существу рассматривается величина условного давления, удельная сила, или условное напряжение в материале, в различных комбинациях её вычисления. Затем эта величина рассматривается как основа критерия или число твердости. Стандартные методы предлагают различные вариации, методы выбора, пересчета, корреляции величины условного напряжения. Затем, эта эмпирическая величина постулируется как число твердости. В эмпирических методах накопился ряд методологических проблем, противоречий в сопоставлении разных чисел твердости (использованы разные инденторы и др.), возник размерный эффект «разного знака» и др. [11].

С точки зрения физики условное давление (эмпирическая твердость) это неоднозначная и нестабильная характеристика процесса в системе «материал – индентор – нагрузка», особенно для разных инструментов, разных кинетических режимов, в том числе одноактное индентирование.

В нашей работе предложен физический подход. Мы используем стандартную кинетическую диаграмму индентирования, которая может быть получена разным инструментом, разным максимальным усилием. Физическая твердость и физическая теория прочности базируются на общей основе – корпускулярно волновой структурно-энергетической кинетической теории твердых тел. Для определения числа физической твердости применяется анализ функции плотности необратимо рассеянной механической энергии. Плотность энергии – работа индентора деленная на величину активированного объема (условного геометрического или физического). Рассматриваем кинетическую силовую диаграмму, параметры геометрии инструмента и активированного (вытесненного) материала при индентировании. В основе физической твердости функция плотности рассеянной энергии от перемещения индентора, функция состояния системы «материал – инструмент – нагрузка». Такую систему обозначаем далее TMSI (термомеханическая система индентирования).

Нами разработана аналитическая основа для создания стандартной универсальной методики определения физической твердости, не зависимо от величины усилия, формы инструмента и др. [10]. Исходными данными для физического метода служат параметры инструмента и физико-механические параметры выбранного процесса стандартного макро, нано-микро режима кинетического индентирования. Физический подход позволил исключить размерный эффект и свойства неоднозначности, присущие эмпирическим методам одноактного механического и кинетического индентирования. Сформулированы критерии подобия и методы сравнения разных чисел эмпирической твердости. Материал характеризуется одним числом (мерой) физической твердости, которая не зависит от инструмента, метода, режима кинетического индентирования. В физическом и эмпирическом методах размерность числа твердости, при формальных операциях с размерностью, совпадают. Но это принципиально различные характеристики физического состояния  $DS$  представленного как TMSI. Число физической



твердости - некоторое значение функции обобщенной удельной мощности необратимого процесса изменения структурно-энергетического состояния TMSI. Эмпирическая твердость это удельная сила (в разных интерпретациях), неоднозначная характеристика состояния TMSI.

Из физического анализа данных кинетического индентирования, получен новый структурно-физический параметр материала -  $D_n, N/m$ . Этот параметр твердости аналитически связан с физическим молярным параметром прочности и долговечности материала  $G_r$ . Таким образом, используя анализ силовой функции кинетического нано-микро индентирования  $F(h)$ , установлена аналитическая зависимость между важными физико-механическими параметрами твердости и прочности, материала.

Используя данные стандартного процесса кинетического индентирования, можно определить значение универсальной физической твердости и значение универсального физического структурно-энергетического параметра прочности и долговечности материала. Эти физические параметры и зависимости теории позволяют аналитически находить время и условия возникновения предельного состояния для заданной переменной нагрузки, различного по природе материала. Одновременно возможно аналитически установить стандартные предельные механические показатели материала непосредственно в элементах действующей конструкции [10].

Кратко основные этапы и результаты нашей работы. Первоначально выполнен аналитический анализ физических свойств силовой функции  $F(h)$ , полученной по стандарту ISO 14577, так же анализ функций параметров объема и площади контактной поверхности при индентировании. Рассмотрены разные инструменты, материалы и режимы. Для описания силовой функции использовались уравнения аппроксимации предложенные в [11]. Результаты нашей работы опубликованы [10].

Используя критерии и методы SET в [10] определены новые физико-механические параметры и характеристики процесса образования контактной поверхности  $S(h)$  и активированного объема  $V(h)$  материала при индентировании. Используются новые геометрические понятия процесса индентирования: условная площадь, физическая площадь контакта, условный и физический активированный объем и др. Главной тезой физического подхода является определение количественной связи между плотностью объемной  $CW$  энергии структуры твердого тела и удельной энергией затраченной на образование единицы площади новой контактной поверхности на единицу объема активированного материала. Рассматривалась связь удельной механической работы  $A(h)$  индентора с разными объективными геометрическими характеристиками процесса, при его перемещении в материале. Мы рассматриваем два разных понятия: наружная поверхность (контактная) и физическая поверхность границы активированного объема внутренних структурно-энергетических  $CW$  состояний материала и др.

Аналитически рассматривались три варианта определения физической твердости как меры плотности энергии кинетического индентирования: средняя интегральная плотность  $PVA(h)$ , дифференциальная  $PH(h)$ , нано-микро дифференциальная  $PHN(h)$ . Форма и размер инструмента, критерии сопоставления, рассмотрены дополнительно, в рамках физического подхода к определению твердости.

$$PVA(h) = \frac{A(h)}{V(h)} = \frac{\int_0^{h(t)} F(h) dh}{V(h)}, J/m^3. \quad (4.1)$$

Где,  $PVA(h) = \frac{A(h)}{V(h)}$ ,  $J/m^3$  - средняя интегральная плотность энергии индентирования.

$V(h)$  - вытесненный, активированный объем,  $F(h) = a \cdot h^n + b \cdot h$ , нагрузка на индентор, аппроксимация полиномом, предложенным в [11]:

$$PH(h) = \frac{dA(F, h, T, E..)}{dV(F, h, T, E,...)} \approx \frac{\partial A(h)}{\partial V(h)}, J/m^3 \quad (4.2)$$

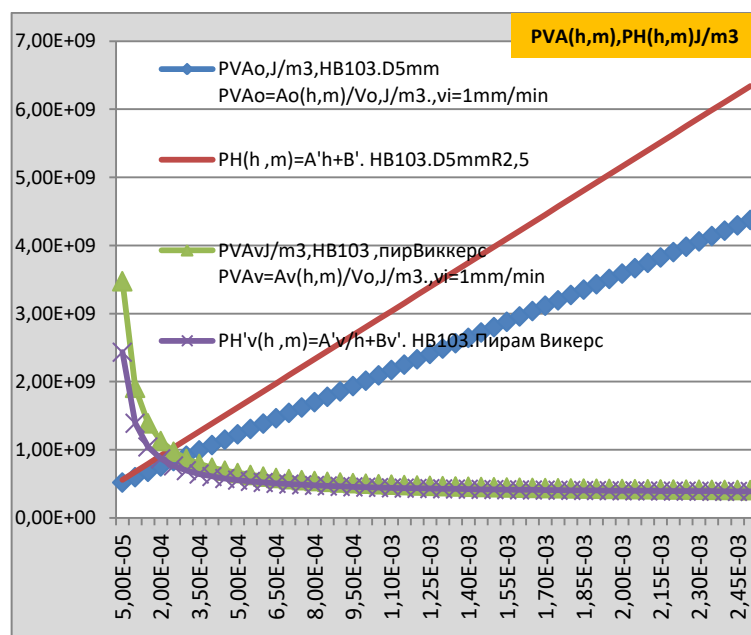
Где,  $PH(h)$  - функция дифференциальной плотности энергии ( $PH$  - physics hardness)

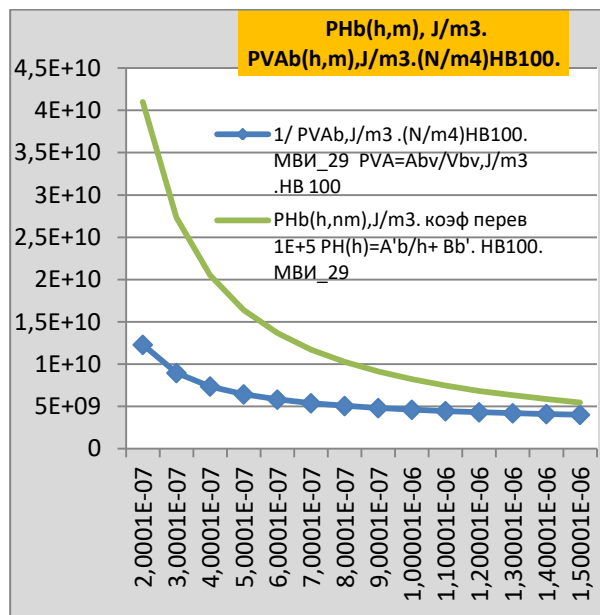
$dV(h)$ ,  $\partial V(h)$  частные дифференциалы и их частные производные,  $T$ ,  $E$  - параметры материала.

$$PHN(h) = \frac{\partial A(h)}{\partial V(h)}, \quad (4.3)$$

Где,  $PHN(h)$  - функция физического нано-микро кинетического индентирования, при предварительном условии  $1 \cdot 10^{-21} < V_{pr} < 1 \cdot 10^{-18} m^3$ ,  $V_{pr}$  - нано-микро активированный объем. Нано режим - меньшее значение. Микро режим - большее значение.

На Рис. 2 функции интегральной плотности энергии  $PVA(h)$  и физической дифференциальной твердости  $PH(h)$ , индентирование стандартной меры HB 103, сфера D5mm, пирамида Виккерса, пирамида Берковича по данным [11].





**Рис.2.** Сравнение характера функций: а) функция плотности энергии  $PVA_o(h)$ , дифференциальная твердость  $PH_o(h)$  индентирование сферой D5mm, Пирамида Виккерса, Мера твердости HB103, б) Пирамида Берковича, Мера твердости HB100,  $PVA_v(h)$ ,  $PH_v(h)$  Построены по результатам обработки функций  $F(h)$ , данные [11].

### **Физическая твердость, определение (кратко).**

Удельное количество энергии затраченной на необратимый процесс образования единицы площади контактной поверхности исследуемого материала, в результате механического давления и перемещения тела индентора определенной формы и размеров в исследуемый материал.  $PH(h), J/m^3$  - функция физической дифференциальной твердости, дифференциальная плотность энергии кинетического индентирования материала. Дифференциальная твердость так же обобщенная удельная мощность необратимых структурно-энергетических преобразований активированного объема материала при его механическом перемещении, образовании новой поверхности, под давлением движущегося индентора.

Число физической дифференциальной твердости  $PH_{st} = PH(h_{st})$  – значение функции твердости при эталонной (стандартной) глубине перемещения  $h_{st}$  сферического индентора. Для сравнения физической твердости полученной разным индентором или режимом, предложен физический критерий подобия процесса:

$$X_{sv}(h) = \frac{S(h)}{V(h)} - \text{удельная площадь индентирования.}$$

### **Физический анализ кинетического индентирования, три метода.**

Исходя из результатов анализа и обобщения свойств функций удельной энергии кинетических процессов, полученных для разных методов и инструментов, на разных материалах, стандартные процессы кинетического не восстановленного индентирования были разделены на *три разных метода* определения универсальной дифференциальной физической твердости материала (физическая твердость).

1. **Первый метод – эталонное** индентирование **сферой** (макро режим, поверхностный).
2. **Второй метод** -индентирование **пирамидой, конусом (острым инструментом)**. Этот метод индентирования совмещенный (двухуровневый), процессы нано-микро и макро. Начальный этап нано-микро, затем совместный процесс.
3. **Третий метод.** Нано-микро индентирование инструментом разной формы.

Из анализа свойств функций эмпирической, физической средней интегральной и дифференциальной плотности энергии индентирования следует, что дифференциальный показатель в большей степени обобщенный (интегральный) информативный и устойчивый. Дифференциальная плотность энергии индентирования стала основой для формирования критерия физической твердости, универсальной единицы твердости. Исследования показали, что индентирование сферой можно представить как эталонный процесс измерения величины физической твердости материала. Были выполнены соответствующие расчеты физической твердости стандартных мер [10]. Для макро кинетического индентирования сферой  $D > 2,5 \text{ mm}$ , физическая твердость инвариантна величине диаметра сферы. Этот макропроцесс назван «ламинарным индентированием».

Для соблюдения подобия (сравнения) процессов, при изменении параметров геометрии индентора, глубины индентирования, в расчете используется коэффициент подобия, он учитывает изменение параметра  $X_{sv}$ . Использование критерия подобия рассмотрено при сравнении физического числа твердости для разных образцовых мер. Сопоставлены метод 1 (индентор сфера) и метод 2 (пирамиды Виккерса) [10]. Разработаны алгоритмы приведения результатов индентирования разными методами и инденторами к величине эталона физической твердости данного материала.

На основе 1го метода индентирования получены зависимости для расчета эталонной единицы абсолютной, относительной физической дифференциальной твердости, предложена универсальная шкала твердости индентирования.

Для исследования свойств физической твердости, выбора единицы измерения, создания универсальной шкалы твердости и др. было введено предварительное понятие эталонный *стандартный процесс* -  $PH_{st}$ . Это значение физической дифференциальной твердости индентирования сферой при движении инструмента до *эталонной (утвержденной стандартом) глубины*. В исследованиях предварительно принята величина:

$$h_{st} = 0,25 \text{ mm} = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ m} .$$

В нашей работе аналитически получены зависимости для сопоставления, перевода в универсальную физическую единицу измерения числа поверхностной эмпирической твердости материала.

Исследования показали, что метод царапания корректно сопоставим с данными кинетического индентирования, отвечают физическому критерию подобии. Следовательно, эти методы аналитически сопоставимы, взаимозаменяемы при решении прикладных задач. Результаты этих разных методик можно отобразить в одних физических единицах твердости.

Физический метод определения числа твердости по данным кинетической диаграммы ISO 14577 позволил исключить ISE (Indentation Size Effect), присутствующей в эмпирических методах индентирования.

В [13] описан принцип индентирования усеченным конусом по методу Кельверта Джонсона, предложенный в 1859г. Суть этого метода – вдавливание усеченного конуса постоянных размеров на постоянную установленную глубину. Этот метод представляет частный случай физического метода измерения кинетической твердости. Значение физической эталонной твердости  $PH_{st}$ , с точностью до постоянного множителя, равно твердости по Кальверту Джонсону. Их метод был потерян за длительный период развития индентирования в разных направлениях. Мы предложили назвать универсальную единицу физической твердости в честь авторов указанного метода:

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

1.CD - один («кедж», «cadg»).

Например, твердость эталонной меры 103НВ соответствует приблизительно 100CD единиц физической твердости.

В работе [10] даны формулы расчета, метод сравнения, коэффициент подобия и др. Определим значение физической твердости вторым методом, в универсальных единицах, используя пирамиду Виккерса, мера 103 НВ. В размерности плотности энергии имеем:  $PHV_{st} = 0.45 \cdot 10^9 \text{ J/m}^3$ . Используя основную формулу (4.3), метод сравнения, для пирамиды Виккерса получим коэффициент подобия  $VTR = 2.3$ . Применения критерий подобия к физическому числу твердости  $PHV_{st}$ , полученному вторым методом индентором пирамида Виккерса, для меры твердости 103 НВ, находим эталонное значение  $PH_{st}$ :

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

Эта величина незначительно отличается от физической твердости полученной первым эталонным методом на сфере на образцовой мере 103 НВ. В универсальных единицах твердости, получим приблизительно 100CD.

Физическая твердость основных конструкционных материалов находится в интервале значений 1-1000CD, не зависимо от типа индентра и режима испытаний. Отношение величин нано-микро и макро физической твердости некоторая постоянная величина, при соблюдении условий подобия.

## **5. Универсальное физическое уравнение нано-микро кинетического индентирования. Физическая модель нано-микро процесса.**

Для оценки прочности и долговечности материалов элементов конструкции новым ускоренным физическим методом представляет интерес универсальное физическое уравнение нано-микро кинетического индентирования. Оно было получено на основе разработанной нами физической модели процесса нано-микро индентирования острым индентором. Рассмотрим главные этапы этой работы.

Расчеты, анализ, обобщение результатов и аналитическое моделирование физических процессов нано индентирования показали, начальный участок кривой, физической и эмпирической твердости, а именно отрезок до перегиба графика и

начальный участок стабилизации процесса (выхода на горизонталь) можно описать как сумму, суперпозицию двух процессов, уравнением [10]:

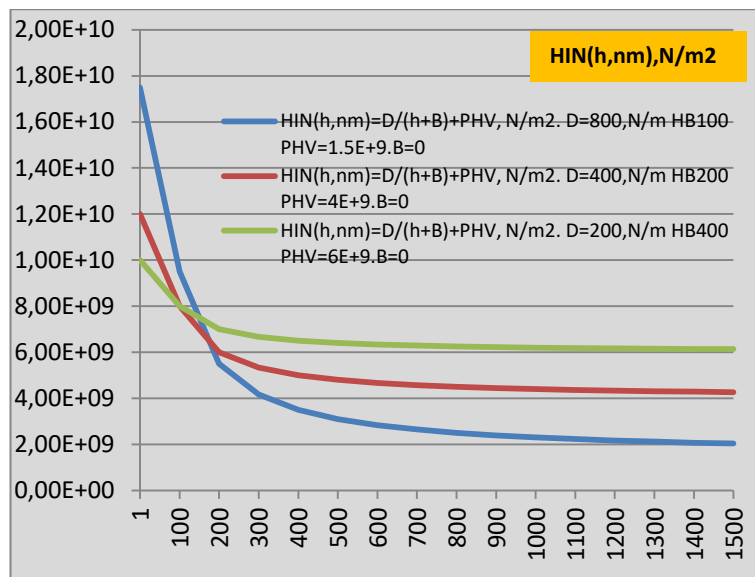
$$HIN(h) = \frac{Dn}{h + B} + HI(h), \text{ J / m}^3 \quad (5)$$

Где,  $Dn$ ,  $B$ , – параметры уравнения эмпирической твердости кинетического нано индентирования, зависят от материала, инструмента и скорости индентирования.

$HI(h)$ - функция процесса или эталонное значение  $HI(h_{st})$  эмпирической твердости, для макро кинетического индентирования данного материала.

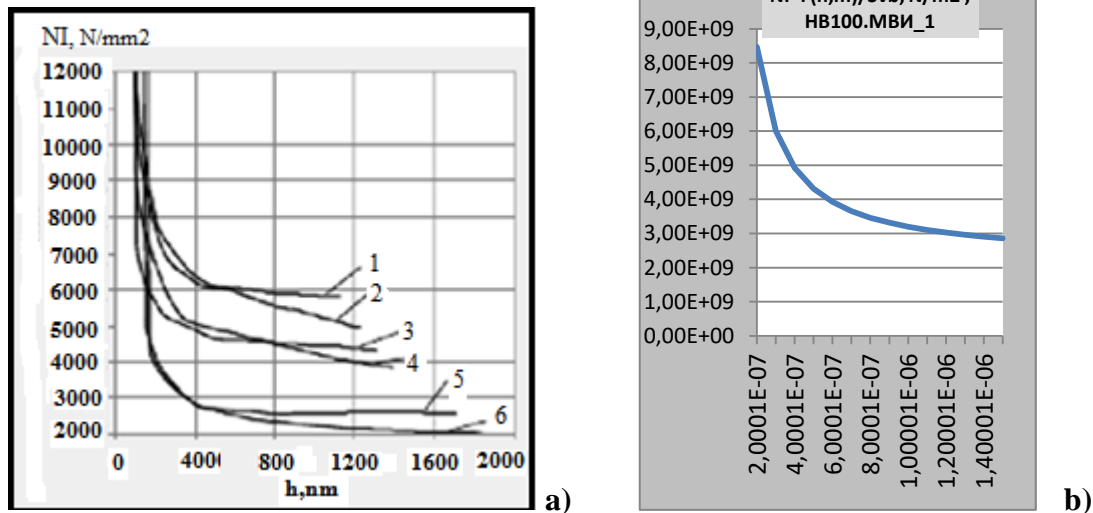
$\frac{Dn}{h + B} = NI(h)$  - функция физического процесса кинетического нано индентирования. Формула получена на основании физической модели нано-микро процесса формирования острым индентором молярного активированного объема твердого тела [10].

$Dn$ ,  $N/m$  - структурно-физический параметр материала.



**Рис.3.** Аналитическое моделирование физических функций нано-микро индентирования  $HIN(h)$  используя уравнение (5). Диаграммы индентирования трех мер твердости HB100/400/660, индентор пирамида Виккерса, заданы параметры  $Dn$ ,  $PH=PHV$ ,  $B=0$ , метод сложения функций нано-микро и макро процессов.

На Рис.3 показаны результаты аналитического моделирования физической функции условного давления нано индентирования  $HIN(h)$ ,  $Pa$ , в первом приближении, используя уравнение (5). Графики построены для трех условных материалов различной твердости HB800/400/200. Для сравнения на Рис. 4 показаны экспериментально-аналитические диаграммы эмпирической твердости: а) полученные на экспериментальной установке наноиндентирования профессором Мощенок [12]; б) диаграмма построена аналитически используя формулы и силовую диаграмму из монографии [ 11].



**Рис. 4.** Поверхностная кинетическая нанотвердость  $NI(h)$  стальных образцов: а) 1 -788HV, 2 – 508HV, 3 – 73,2 HRA, 4 – 411HB, 5 – 28,9HRc, 6 -103HB [12]. б) диаграмма  $NI(h) = F/27h^2$  пирамида Берковича, образцовая мера HB103, построена используя аппроксимацию экспериментальной функции  $F(h)$  [11].

В физической модели процесса нано индентирования Рис.4б величина давления  $NI(h)$  в активированном объеме зависит от структурно физического параметра  $Dn$  и глубины перемещения  $h$ . Параметр  $Dn$  характеризует в большей степени структурно-физические свойства или нано-микро твердость материала. В эмпирическом методе давление определено формулой  $NI = F/S$ , где усилие на индентор  $F$  и значение условной площади контакта  $S$ . Для нано-микро процессов, в расчетах физической твердости, применять понятие геометрическая площадь контакта некорректно. Уравнение (5) моделирует СВ процесс необратимых изменений, при индентировании острым инструментом, в *физическом* нано-микро активированном объеме материала. Уравнение можно применять для аппроксимации эмпирических графиков индентирования, полученных стандартными методиками (Рис. 4). Мы предполагаем, что на первом этапе нано активации скрытой энергии структуры материала параметр  $Dn$  точнее показывает функцию давления, чем эмпирический метод. В работе [10] показана аналитическая связь  $Dn$  с характером силовой функцией  $F(h)$  и значением числа твердости. Для последующего практического использования полученного нами физического метода необходимы дополнительные расширенные исследования.

## 6. Модель и функция структурно-энергетических преобразований материала, нано индентирование SI инструментом. Leading process.

Уравнение (5) получено на основании нашей гипотезы суперпозиции двух условных вариантов физических СВ процессов кинетического индентирования SI инструментом. Первый процесс SI индентирования «турбулентный», это необратимые разрушения нано – микро структуры твердого тела [10]. Второй вариант индентирования - «ламинарный» режим. Необратимые деформации формы и контактной поверхности активированного объема, условная сфера,  $h > 1.0\text{mkm}$ .

Исследования свойств диаграмм твердости  $HI(h)$ ,  $NI(h)$  позволяет предположить, что падение удельной молярной мощности необратимых разрушений nano структуры в физическом объеме активации происходит до точки перегиба диаграммы  $NI(h)$ . Формирование, релаксация физической системы характеристических флуктуаций nano индентированного объема (релаксация) происходит на участке  $h < h_r$ ,  $h_r = 5-100$  nm. Продолжительность релаксации зависит от материала и подготовки поверхности. В момент касания поверхности вершиной индентора активируется локальный «взрывной» процесс выделения скрытой энергии плавления твердого тела. В период релаксации плотность энергии значительно больше, чем при ламинарном процессе макро индентирования [10]. Анализ экспериментальных данных показал, у конструкционных материалов физический объем nano-микро активации  $V_p$  приближенно в интервале значений  $1 \cdot 10^{-21} < V_p < 1 \cdot 10^{-18}$  м<sup>3</sup>. В физическом объеме  $V_p$  активируется большая плотность  $CW$  энергии. Это результат концентрации в нем необратимых разрушений объемных nano-микро структурных ассоциированных конструкций (решетка, молекула, кластер и др.). Объем  $V_p$  окружает относительно холодное тело, граница физического объема имеет малую площадь поверхности, она отражает внутренние волны  $CW$  процесса. Это граница разных  $CW$  процессов. Первоначально, этап релаксации, нет достаточного рассеяния выделяющейся в  $V_p$  энергии. Энергия разрушительных флуктуаций аккумулируется в малой области. Одновременно растут глубина перемещения инструмента  $h$ , объем механически активированной области  $V_a$ , площадь механического контакта и условной физической поверхности объема  $V_p$ . Растет абсолютное количество мощных разрушительных необратимых флуктуаций в этом объеме, изменяются молярные параметры TMS. Расчеты показывают, что с момента  $h > h_r$  безразмерная скорость высвобождения энергии становится меньше чем безразмерная скорость роста объема активации, следовательно, плотность энергии убывает. В физическом активированном объеме материала  $V_p$ , перед вершиной острого индентора, начинается падение плотности энергии и условного давления  $NI(h)$ , Рис.5. Таким образом, в активированном объеме  $V_p$ , в результате последовательного сканирования [14] параметров молярной энергии ( $CW$  параметров энергии характеристических флуктуаций), обязательно наступает момент формирования физического состояния с молярными параметрами характерными для данного материала. Образуется физическая активированная nano область разрушительных флуктуаций энергии, корневой молярный объем характеристических флуктуаций  $V_\mu$ . Схематически можно обозначить процесс  $V_p \rightarrow V_\mu$ . Физические параметры молярного корневого объема  $V_\mu$  зависят от энергии исходной структуры материала, скорости индентирования, параметров и свойств тела  $V_p$ , а так же окружающего объема (теплопроводность, упругость, и т.д.). Основное качество молярного корневого объема - он подобен состоянию изотропного однородного твердого тела с собственными, характерными физическими параметрами. Форма индентора в начальный период формирования  $V_\mu$  имеет, предположительно, второстепенное значение. Величина молярного nano активированного объема  $V_\mu$  данного материала – объективная физико-механическая характеристика материала, функция физических свойств веществ в данной системе и определенной удельной мощностью необратимого процесса высвобождения  $CW$  энергии SES материала при движении индентора. Предполагаем, что в точке

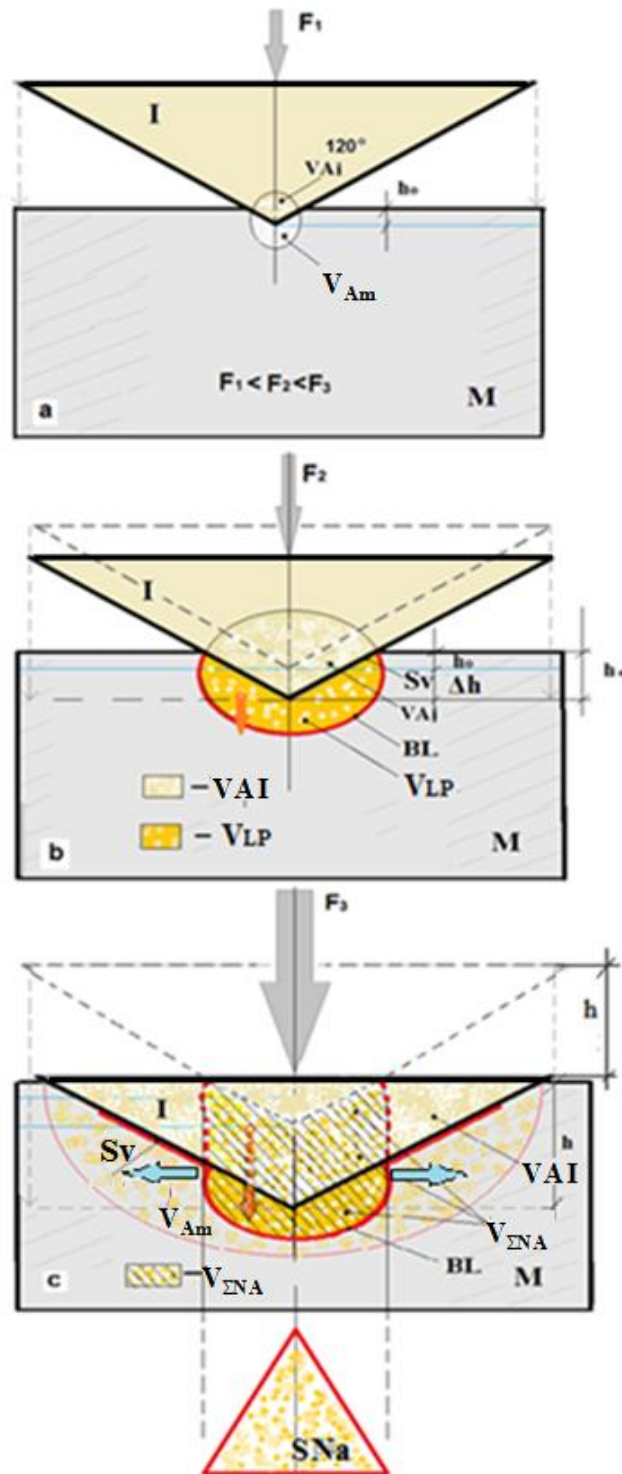


перегиба физической и эмпирической диаграммы нано-микро индентирования, завершается процесс формирования характерного молярного объема  $V_{\mu}$ .  $D_n$  - параметр формы гиперболы, интегральная характеристика процесса. Мы предположили присутствие связи корневого молярного параметра структуры  $G_r$  и физического параметра твердости материала  $D_n$ .

**Модель процесса.** Перед движущейся вершиной SI индентора в момент контакта с материалом возникает нано область – физический активированный объем с высокой плотностью энергии флуктуаций. Начальный процесс нано индентирования рассматривается с позиции физической структурно-энергетической теории прочности [2,10]. Перед вершиной SI индентора формируется область высокой плотности CW энергии волн-квазичастиц, область высокой активации разрушительных процессов. Обозначим этот физический объем -  $V_{LP}$ . Предполагаем, что в нем происходит процесс лидирующих **структурно-энергетических преобразований (LP - leading process)**. Экспериментальные и аналитические исследования, косвенно указывают на устойчивость и индивидуальность основных параметров в этой области. На Рис. 5 показаны схематически основные этапы процесса формирования и движения LP области нано-микро индентирования.

Большая начальная плотность энергии в  $V_{LP}$  результат накопления освобожденной энергии необратимых разрушений исходного структурно-энергетического состояния (SES) материала. В этот период происходит разрушение структуры потокa устойчивого упорядоченного вихревого и колебательного движения энергии волн-квазичастиц в объеме  $V_{LP}$ . Это начальное состояние в физической теории рассматривается как исходная, корневая плотность CW энергии нано-микро структуры твердого тела. В теории металлов этот процесс связывают с высвобождением скрытой теплоты плавления. Особенность волнового процесса в объеме  $V_{LP}$  - способность внешней физической границы данного объема отражать внутрь (возвращать) волны освободившейся CW энергии. В этом объеме созданы локальные физические условия для адиабатического процесса. Подобную роль границы ударного волнового физического процесса можно видеть в эффекте Прандля Глоэрта. В классической атомарной модели прочности и разрушения твердых тел рассматривается разрыв атомных связей (short-range interaction), поэтому такая физическая модель процесса невозможна. В упрощенной физической модели предполагаем, что объем  $V_{LP}$  обладает собственными однородными, изотропными высокими термодинамическими и энергетическими параметрами. В ряде случаев нано индентирования экспериментально наблюдаются скачки силовой диаграммы [14], предположительно, наблюдаем локальную анизотропию CW процесса. О физической природе и условиях формирования устойчивого состояния, гомеостаза необратимых преобразований нано структуры твердого тела в работе [15]. При механическом перемещении острого индентора происходит одновременное перемещение, границы контакта и движение области  $V_{LP}$ . По сути, движение вершины SI *вызывает трансляцию* состояния *высоко активных* необратимых процессов нано пластической зоны LP в глубину тела. Основная энергия активированного объема  $V_{LP}$  переносится не массой частиц, но квазичастицами вихревых волновых нано процессов. Физический

объем  $V_{LP}$  характеризуется большим значением плотности энергии необратимого процесса, большим контактным давлением или шаровым тензором, большой температурой.



**Рис.5.** Модель формирования nano активированного объема материала, **leading process** структурно-энергетических преобразований острым индентором пирамида Беркоича: а- начальный этап до глубины  $h_0$ ; б – формирование активированной области  $V_{LP}$  **leading process**; в – трансляция LP активации с высокой плотностью энергии, формирование суммарного объема  $V_{\Sigma NA}$ ; Голубыми стрелками показано рассеяние энергии LP.

**Обозначения на Рис.5:**

**I** – индентор; **M** – материал для индентирования;  $F_i$  - усилие на индентор в разный период процесса активации;  $\Delta h$  - перемещение индентора в устойчивом процессе активации; **VAI** – активированный объем в теле инструмента;  $V_{Am}$  - активированный объем процессов деформирования в теле M.  $V_{LP}$  - активированный физический объем leading process необратимых структурно-энергетических преобразований;  $S_{LP}$  - поверхность активированного объема  $V_{LP}$ ;  $V_{\Sigma NA}$  – накопленный суммарный объем активации в результате  $\Delta h$  перемещения индентора; **Sv** – активная контактная поверхность индентора и отпечатка; **SNa** – проекция nano активированного объема индентора трехгранная пирамида на плоскость образца материала; **BL** - поверхность  $V_{LP}$ .

В работе И.Д. Ибатуллина [15] рассмотрены экспериментально подтвержденные локальные процессы возникновения высоких температур в точках контакта структурных элементов твердых тел при трении и силовом контакте металлических поверхностей. По нашему предположению, в результате силового контакта поверхности индентора и материала формируются высокотемпературные и нагруженные большим давлением элементарные nano области, в которых достигается температура плавления контактирующих тел. Анализ экспериментальных результатов указывает на анизотропию этих параметров и состояний материала. Элементарные состояния флуктуаций при последующем движении вершины индентора образуют однородную систему высоко активированного состояния вещества. Современные экспериментальные исследования подтверждают это. Некоторые результаты наших исследований [10], косвенно подтверждают эти предположения. Например. Определим плотность энергии металла, при плавлении чистого железа, используя средние справочные показатели. Удельная теплота плавления чистого железа  $\lambda = 270 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$ , плотность  $\rho = 7870 \text{ kg/m}^3$  **NI(h)**, легко получим удельную объемную теплоту плавления железа  $\lambda_v = 2,1 \cdot 10^9 \text{ J/m}^3$ . Эта величина согласуется с плотностью энергии PVA для макро индентирования сталей. Плотность энергии nano индентирования сталей на интервале до 400nm  $PVA = (4 \div 100) \cdot 10^9, \text{ J/m}^3$ . Как видим, величина физической nano твердости металлов превышает значение удельной теплоты плавления. Оценка потерь на рассеяния тепла показала, что в начальный период SI индентирования энергии достаточно для перехода от твердого состояния локального объема твердого тела в квазижидкое. Подобный результат получен для алюминия и вольфрама.

В модели nano индентирования глубину  $h$  представим как характерный размер радиуса сферы физического nano активированного объема  $V_{LP}(h)$ . В объеме  $V_{LP}(h)$ , предположительно, до глубины  $h = L_{pmi} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 1.0 \text{ mkm} \approx 1000 \text{ nm}$  присутствует всестороннее сжатие материала. Давление (напряжения) в активированном объеме  $V_{LP}(h)$  по трем осям тензора предполагаем одинаковое. Давление в объеме  $V_{LP}$  nano-микро индентирования, до глубины около 1000nm, задаем функцией leading process структурно-энергетических преобразований для SI инструмента:

$$NI(h) = \frac{Dn}{h + B}, \text{ Pa} \quad (6)$$

Где,  $Dn, N/m$ .  $B \geq 0$ ,  $m$  – константы нано индентирования SI инструментом, зависит от материала, формы инструмента, температуры и скорости индентирования.

Используя физический анализ кинетического индетирования, получен аналитический метод оценки новых физических интегральных универсальных параметров твердости материала. Определена аналитическая зависимость физического и эмпирического числа твердости материала. Разработана основа метода определения универсального физического числа твердости, получены физическое уравнение нано-микро индентирования и новый структурно-физический параметр нано-микро твердости материала.

### 7. Соотношение структурно-физического параметра твердости и структурно-энергетического параметра прочности и долговечности материала.

Для описания экспериментальных зависимостей процесса нано-микро кинетического индентирования и процесса разрушения нано-микро тонких образцов материала при растяжении, была использована общая физическая модель и уравнения (5), (6) корпускулярно-волнового энергетического CW процесса. При сопоставлении полученных аналитических функций этих зависимостей было установлено их подобие. В результате мы получили формулу (7), которая отображает предполагаемую связь структурно-физического параметра нано-микро твердости  $Dn$  и структурно-энергетического параметра прочности материала  $Gr_0$ .

$$Gr = k_G Dn, \quad \text{J / mol} \quad (7)$$

Где,  $k_G, m^2 / mol$  - нормировочный коэффициент перевода физической твердости в размерность структурно-энергетического параметра прочности материала.

Основные этапы обоснования формулы (7). На Рис. 6 показаны графики функций четырех различных физико-механических процессов, отражающих необратимое изменение формы, разрушения структуры в объеме материала. Показана зависимость давления, напряжений разного знака, от объема или характерного размера, разной материальной среды (A,B,C,D):

A. закон состояния идеального газа (изотермы), масса постоянная:

$$pV_\mu = G(T, M_\mu). \quad \text{J / mol}, \quad T = \text{const}, \quad M = M_\mu = \text{const}, \quad G = \text{const} \quad (8.1)$$

B. Закон структурно-энергетического состояния деформированного твердого тела в условиях постоянной температуры (изохронно – изотермы):

$$\sigma \cdot Sh = Gr, \quad \text{J / mol}, \quad Gr = \text{const} \quad (8.2)$$

C. Физическое уравнение нано-микро индентирования:

$$NI(h) \cdot h = Dn, \quad \text{N/m}, \quad \text{J} \quad (8.3)$$

Где,  $h \sim V_{ap}$ ,  $V_{ap}$  - физический объем активации разрушения нано структуры.

D. Предел истинной прочности при растяжении  $\sigma_*(h_v)$  нано слоя чистого металла, нанесенного на поверхность упругого полимера, толщина  $h_v$  слоя:

$$\sigma_* h_v = D_\sigma, \quad \text{N/m} . \quad (8.4)$$

Легко видеть подобие этих функций. Мы предполагаем, что в основе каждого процесса лежит нано-микро корпускулярно-волновой механизм необратимых преобразований СВ энергии нано-микро структуры и геометрической формы малого активированного объема материальной среды. Каждый анизотропный или изотропный квазиравновесный процесс на Рис. 6 характеризуется своим постоянным потенциалом плотности потока работы ( $G, Gr, Dn, D_\sigma$ ) или потоком энергии давления (напряжения). Формально, в каждом варианте, произведение функции и аргумента постоянная величина. Идеальный газ, в отличие от твердого тела, имеет потенциал изотропного структурно-энергетического СВ процесса [6]. Графики всех функций Рис.6 подобны, представляют гиперболы, уравнение имеет вид  $Di = X \times Y$ , где  $Di$  - некоторая константа произведения двух переменных  $X, Y$ . Свойство функций: произведение функции и аргумента в некотором физическом процессе равно константе, имеем инвариант произведения двух переменных в каждой точке функции, при постоянных макро параметрах выбранной термомеханической системы.

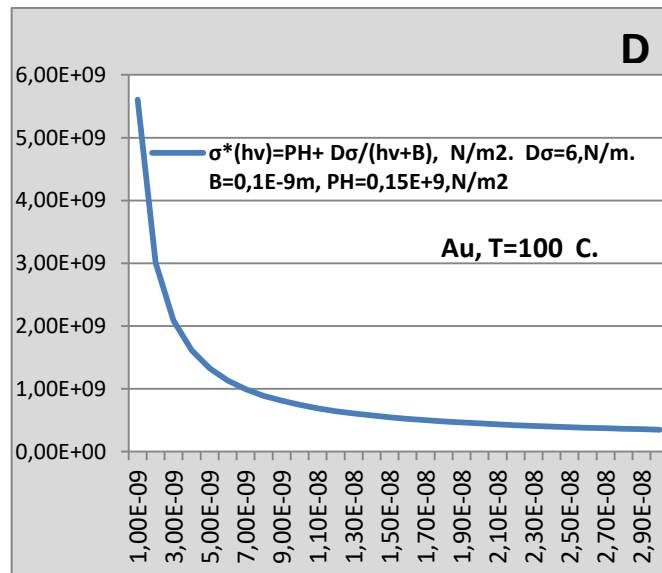
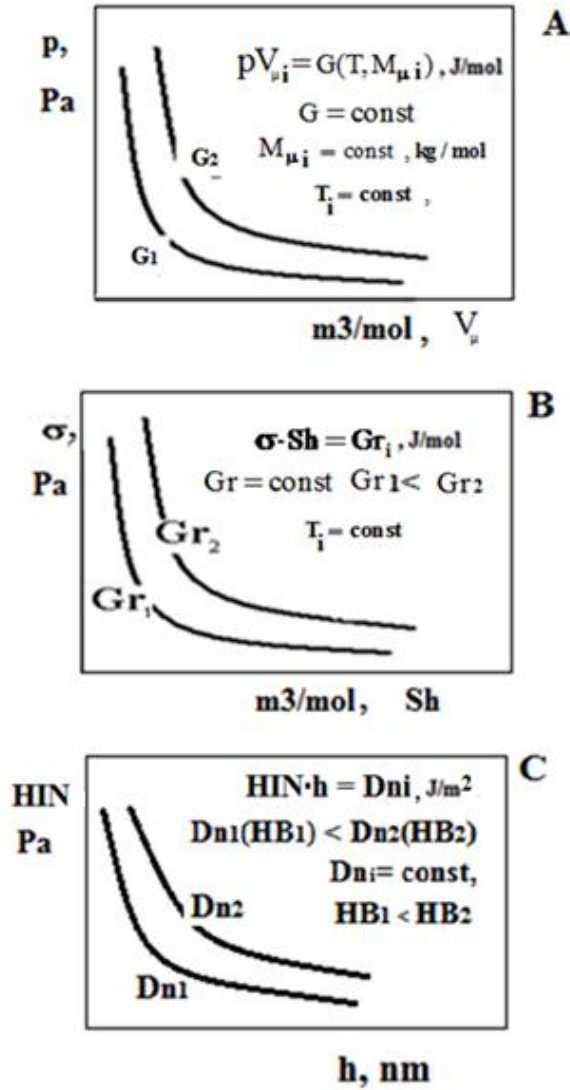
О выводе формулы (8.4). Используя экспериментальные свойства разрушения нано покрытия чистого металла [16], а так же нано-микро индентирования чистых металлов, была получена функция структурно-энергетического нано процесса необратимого деформирования и разрушения материала независимая от знака напряжений. Установлена аналитическая связь величины физического активированного объема и разрушающих напряжений [10]. В [16] показаны экспериментальные зависимости предела прочности на разрыв нано покрытия из чистого металла. Нано слой металла наносится на поверхность прочного полимера, который упруго растягивается до разрушения покрытия из металла. Была получена зависимость:

$$\sigma_* = \frac{L\sigma_0}{4h_v} \quad (9.1)$$

Где,  $\sigma_0$  - напряжение в полимере при деформации 100%,  $L$  – характерный размер одинаковых фрагментов разрушенного покрытия металла. Из (9.1) преобразуя, получим:

$$\sigma_* = \frac{D_\sigma}{h_v}, \text{ Pa.} \quad (9.2)$$

Где,  $D_\sigma = \frac{L\sigma_0}{4}$ ,  $\text{N/m}$  - константа структурно-физического состояния термомеханической системы металл-полимер. Из (9.2) преобразуя, получим (8.4).



**Рис. 6.** Графическое отображение структурно-энергетического закона для разных термомеханических систем: А – закон состояния идеального газа, изотермы, масса постоянная; В – закон структурно-энергетического состояния деформированного твердого тела (изохронно – изотермы). С – физическое уравнение нано-микро индентирования. D - аппроксимация уравнением (5) экспериментальной зависимости истинного предела прочности  $\sigma_*(h_v)$  нано слоя чистого золота от его толщины  $h_v$  [16].

Формула (8.4) получена путем элементарных преобразований зависимости (9.2). Формула хорошо аппроксимирует гиперболой экспериментальные данные [16]. На Рис. 6D аппроксимация уравнением (8.4) и (5) экспериментальной зависимости  $\sigma_*(h_v)$  для нано слоя чистого золота,  $T = 100\text{C}^\circ$ , гипербола со сдвигом на величину константы РН, данные [10].

В расчете молярного параметра энергии структуры  $Gr$ , для обычных условий эксплуатации материалов, используя данные уравнение (5) индентирования, следует учитывать анизотропию и высокие физические параметры (давление, температура) в активированном объеме нано-микро индентирования.

Пример использования формулы (7) для определения параметра нормировки  $k_G$ . Сплав 1201Т1, структурно-физический параметр индентирования  $Dn = 8 \cdot 10^3, \text{N/m}$  определен формулой (5), Параметр  $Gr_0 = 2,77 \cdot 10^7 \text{J/mol}$  получен в работе [10]. Значение  $\gamma_0 = 0,195 \cdot 10^{-3} \text{m}^3 / \text{mol}$  получено по формуле (2.2). Из этих результатов и формулы (7) получим коэффициент пересчета:

$$k_G = 3,5 \cdot 10^3, \text{m}^2 / \text{mol}.$$

Предварительные расчеты влияния основных физических параметров состояния материала на величину  $Gr(T, \sigma_{sh}, \sigma, E)$ , где  $\sigma_{sh}$  - напряжение шарового тензора, показали теоретическую возможность применения формального преобразования размерности в зависимости (7). Аналитическая оценка влияния высоких термомеханических параметров процесса нано-микро индентирования, показала прогнозируемую величину роста параметра  $Gr$  в  $k_p \approx 10^3$  раз. С учетом влияния роста физических параметров при индентировании, получим из (7) уточненную формулу:

$$Gr = k_p \bar{k}_G Dn, \quad \text{J/mol} \quad (10)$$

Где,  $k_p \approx 10^3$ , - корректирующий коэффициент роста  $Gr$ , учитывающий различие физических условий индентирования и растяжения нано-микро образца. Получим в результате нормировочный коэффициент  $\bar{k}_G \approx 1,0 \text{m}^2 / \text{mol}$ .

Из сравнения графиков и формул можно видеть, зависимость (8.4) подобна по форме и содержанию структурно-энергетическому закону физической теории прочности (8.2) [3,6]. Характерный вид функций  $HIN(h)$  нано твердости можно обнаружить в экспериментальных данных свойств нонотвердости серебра и золота [10,14]. При больших значениях плотности энергии в нано-микро объемах материала, выше плотности энергии плавления, независимо от знака напряжений, наблюдаем аналогию функций тонких энергетических процессов необратимого формоизменения и разрушения твердых тел. Этот результат позволил сделать предположение, в разных по внешней форме физико-механических процессах, присутствует единый механизм корпускулярно-волновой природы. Это структурно-энергетический нано микроскопический процесс необратимых преобразований формы активированного объема тела, изменение отношения объема и поверхности (параметр  $X_{sv}$ ) и молярных энергетических параметров тела.

Таким образом, формулы (7), (10), связывают структурно-физический параметр нано-микро твердости  $D_n$  и физический структурно-энергетический параметр прочности материала  $Gr$ .

## 8. Обсуждение результатов.

Используя зависимости SET, установлена связь между физическими параметрами и стандартными механическими предельными показателями прочности, пластическими деформациями, теплообразованием, количеством дислокаций и др. характеристиками исходного и поврежденного материала.

Используя уравнения теории и физические начальные параметры материала можно выполнить расчет прочности, долговечности. В п.3. пример решения данной задачи, для заданной нагрузки  $\sigma(t)$  и заданной постоянной температуры. Для расчета начальных параметров материала  $U_0, \gamma_0(0), Gr_0 = 0.5E\gamma_0(0)$  (граничные условия уравнения) был использован анализ реологических функций  $\sigma(t)$  и  $\epsilon(t)$ .

Для разработки комплексного инженерного аналитического физического метода расчета прочности, долговечности, необходимо завершить работу по систематизации методов оценки структурно-энергетического параметра материала  $Gr$ . В статье мы рассмотрели метод на основе нано-микро кинетического индентирования.

$U_0$  - второй параметр граничных условий основного уравнения (3), он учитывает в большей степени макро свойства TMS, особенности изменения объема, удельный показатель границ активированной области и др. Имеем несколько способов определения энергии активации разрушения  $U_0$ , это тема следующей статьи.

В настоящее время многими специалистами разработаны методы анализа данных силовой диаграммы кинетического индентирования материала, которые позволяют с достаточной для инженерных расчетов точностью определять напряжения, действующие в элементах конструкции. Принципы такого метода можно видеть, например в [17,18]. Объединив эти исследования и методы SET, на основе данных индентирования, открывается перспективное направление комплексного применения физических методов. По результатам комплексного анализа кинетического индентирования можно оперативно и эффективно одновременно исследовать напряжения, параметры твердости, прочности, долговечности, поврежденности материала, непосредственно в элементах действующих конструкций уникальных сооружений и др.

Аналитические методы определения физической твердости по данным кинетического индентирования позволяют оценить действующее значение структурно-физического параметра  $D_n$ , приобретенного в процессе накопления материалом повреждений (пластических деформаций и др.). Мы предлагаем методы, которые позволят аналитически построить диаграмму начального «нулевого» процесса, в отсутствие поля напряжений. Таким образом, физический метод анализа данных нано-микро индентирования позволяет выполнить операцию тарировки и юстировки программы и алгоритма обработки данных кинетического нано-микро индентирования. Аналитически можно получить диаграмму индентирования «нулевого» процесса для поврежденного нагрузками материала в конструкции. Тем самым, можем аналитически



корректировать данные процесса индентирования, учитывать действующие напряжения в материале и необратимые изменения материала элемента конструкции.

Проведенные нами исследования показали, что параметры и свойства силовой экспериментальной диаграммы полученной методом царапания можно успешно анализировать физическим методом и критерием твердости. Величина физической дифференциальной твердости материала по данным нано-микро кинетического индентирования и величина полученная методом царапания отвечают критерию подобия. Значение физической дифференциальной твердости материала, полученное методом кинетического индетирования, отличается на постоянный множитель от физической твердости, полученной методом царапания. Этот важный теоретический результат нуждается в экспериментальной проверке.

**Отличие и преимущества** физического метода. Молярные физические  $CW$  параметры состояния материала как ТМС позволяют рассматривать влияние различных физических, химических, электрических, радиационных и др. факторов влияющих не только на механическую прочность и долговечность, но способность сохранять (терять) первоначальные параметры химического, технологического и др. качества и характера. Молярные физические характеристики могут отображать процесс изменения физической, термической, химической, электрической и др. прочности и долговечности. Положительное свойство физической структурно-энергетической теории состоит в том, что практически любые физические свойства материала и факторы воздействия (нагрузки) на него, могут быть количественно оценены и сопоставимы через  $CW$  молярные параметры, через их корпускулярно вихревые, волновые, энергетические свойства. Молярные энергетические характеристики внешних факторов и внутренних состояний сопоставимы и взаимосвязаны. Частным примером использования подобной физической взаимосвязи, служит спектроскопия в материаловедении, акустические методы контроля микроскопических разрушений материала в механике. Реологические изменения (во времени) интересующего нас свойства материала под воздействием физического и химического, технологического и др. фактора можно исследовать соответствующими реологическими уравнениями физической теории прочности. Это возможно, поскольку присутствует корреляция молярных параметров с физико-химическими и др. свойствами материала. Например, в работе [19] установлена связь молярных параметров  $U_0, \gamma_0$  с теплоемкостью, коэффициентом линейного расширения, плотностью и др. Исследование нового направления физической теории прочности твердого тела перспективно, особенно при разработке нано технологий, для теоретического прогнозирования свойства прочности новых материалов, предварительной оценки прогнозируемых предельных параметров в различных комбинированных условиях эксплуатации. Физический подход существенно расширяет возможности расчетов прочности и долговечности материала в нестационарных условиях эксплуатации.

Предварительные исследования физическими принципами влияния водородного фактора на прочность каменной соли, в разных по концентрации растворах соли в воде, по результатам экспериментальных работ Иоффе [20], дали положительные результаты. Используя молярные параметры каменной соли и растворов, аналитически было учтено влияние ионов водорода на предел прочности кристалла каменной соли, в растворах разной концентрации. Теоретически было учтено влияние водорода на параметр энергии

активации разрушения. Эти результаты подтвердили наши предположения, физические зависимости теории позволяют оценить влияние дополнительных физико-химических факторов на прочность кристалла.

Комплексный физический метод исследования твердости и прочности материала позволяет исключить ряд промежуточных трудоемких и затратных процессов связанных с определением механических эмпирических показателей и параметров прочности материала. Пример рассмотрен в [7].

## **9. Выводы.**

Подготовлена теоретическая основа для создания алгоритмов и программы по определению универсальных параметров физической твердости материала на основе данных стандартного процесса кинетического индентирования. Данные можно получать различным методом и индентором. Разработаны основы аналитических методов определения параметров уравнения кинетической твердости, молярных физических структурно-энергетических параметров прочности и долговечности конструкционных материалов

Полученные результаты предполагают дальнейшую разработку теории и проверку полученных зависимостей и методов совместно со специалистами различных направлений.

Предлагаю, заинтересованным организациям, создать объединенную группу специалистов различных научных направлений (прочности, материаловедения, физики, химии, математики), для дальнейшей совместной теоретической и экспериментальной работы и применения физических методов в исследованиях твердости, прочности, механики разрушения материалов, практического использования результатов и подготовки инженеров нового направления.

## **Перспективы.**

1. Учет различных факторов (физических нагрузок) на свойства прочности, долговечности, пластичности конструкционных материалов.
2. Создание универсальных методов и программы обработки данных кинетического индентирования.
3. Разработка нового универсального физического стандарта твердости и метода обработки данных индетирования.
4. Разработка методов мониторинга состояния прочности, поврежденности долговечности элементов конструкций уникальных сооружений.
5. Разработка программы системного анализа данных датчиков деформаций (напряжений) и данных нано-микро индентирования в элементах машин при эксплуатации.

Приглашаем партнера, инвестора, на совместную разработку мобильного комплекса для обследования материала в элементах конструкции. Комплекс предполагает программу и методику сканирования индентором поверхности, аналитическую оценку параметров прочности, долговечности, физической твердости, оценку стандартных

*Автор благодарит **Василия Мощенка** профессора ХНАДУ г. Харьков за предоставленный экспериментальный материал, монографию по индентированию и консультации.*

#### Литература.

1. Н.А.Штырёв. Физические параметры и свойства деформированного твердого тела в структурно – энергетической кинетической теории прочности. Примеры решения задач прочности и усталости / Н.А. Штырёв «Энергия долговечности». №5. 2013г [//energydurability.com](http://energydurability.com)
2. Н.А.Штырёв. Деформирование и разрушение твердых тел с позиций кинетической структурно-энергетической теории прочности / Н.А. Штырёв // 5я Международная конференция механика разрушения и прочность материалов. ФМИ НАН Украины, 2014. Львов. с.63-70.
3. 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](http://energydurability.com)
4. 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.
5. Л.Д. Ландау, Е.М.Лифшиц Статистическая физика. Часть 1.М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1976. - 584 с. (т. V)
6. Н.А.Штырёв. Структурно-энергетическая теория прочности. Реферат 2017г. [//energydurability.com](http://energydurability.com)
7. N. Shtyrov 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
8. С.Н. Журков, Т.П. Санфирова Температурно-временная зависимость прочности чистых металлов / Доклады АН СССР. 1955г. 2. 101. с.237-240
9. С.Н. Журков Кинетическая концепция прочности твердых тел / С.Н. Журков Вестник // АН СССР №3 1968г.с.46-52.
- 10.Н.А.Штырёв. Физическая теория прочности. Гл.7 . Методы определения физических структурно-энергетических молярных параметров конструкционных материалов. [//energydurability.com](http://energydurability.com), 2020.
11. В.И. Мощенок Современные методы определения твёрдости. LAP Lambert. 2019. - 382с.
12. В.И. Мощенок Новые методы определения нано и микротвёрдости материалов. Вестник ХНАДУ, №46,2009, 34-38с.
13. F. Crace Calvert, Richard Johnson. On the hardness of metals and alloys. JFI, volume 67, issue 3, march 1859, pages198-203.

14. Ю.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
15. И.Д. Ибатуллин Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев. Самара. СГТУ, 2008. 387 с.
- 16.Волынский А.Л. Зависит ли прочность твердого тела от его размеров? Природа, №9, 2007г, 14-19с.
- 17.Lee, Y.-H., & Kwon, D. (2004). Estimation of biaxial surface stress by instrumented indentation with sharp indenters. Acta Materialia, 52, 1555–1563
- 18.J. G. Swadener, B. Taljat, and G. M. Pharr, Measurement of residual stress by load and depth sensing indentation with spherical indenters, J. Mater. Res. 16 (7), 2091-2102 (2001).
- 19.Журков С.Н. К вопросу о физической основе прочности. ФТТ т.22 , №11, стр.3344-3349. 1980г.
- 20.Иоффе А.Ф. Избранные труды. Том 1. Механические и электрические свойства кристаллов. Наука. Ленинград. 1974, 327.