

Оценка прочности, усталости, долговечности и повреждений материала используя физические параметры и критерии.

Shtyrov Nikolay

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

E-mail: nasht@ukr.net

Рассмотрены методы физической теории прочности. Аналитически определены начальные физические и механические параметры прочности стали 45. Физическими методами выполнен расчет долговечности, усталости, поврежденности стали для нестационарных механических и тепловых нагрузок. Аналитически определена связь физических и механических параметров прочности. Изложены результаты расчетов измененных характеристик прочности поврежденного материала, учитываются пластические деформации, циклические напряжения произвольной формы, температурный режим. Используются собственные программы расчетов новых характеристик поврежденного материала для разной функции напряжений. Физический метод позволяет анализировать данные датчиков нагрузки, индентирования по ISO 14577 в элементах машин. Физические параметры материала и новые теоретические методы расчета можно применять для контроля состояния прочности механизмов машин при эксплуатации.

Ключевые слова: напряжение, деформация, прочность, физическое уравнение, расчет.

Вступление.

Цель статьи показать основные физические параметры, зависимости, методы расчетов в физической структурно-энергетической теории прочности деформированного твердого тела (далее кратко DS). Основное уравнение физической теории. Связь физических молярных параметров состояния и обычных механических свойств и параметров материалов. Примеры использования физического метода для теоретического определения начальных физических параметров и обычных механических параметров стали 45 по реологической диаграмме испытания материала. Аналитическая оценка стандартных механических характеристик по начальным физическим параметрам материала, используя обобщенную реологическую деформационную диаграмму растяжения. Теоретическая оценка параметров прочности, долговечности, усталости стали 45, примеры для разных циклических нагрузок и температурных режимов. Направление практического применения физического подхода для оценки прочности, поврежденности машин и механизмов.

Используя уравнения и формулы физической теории, установлена объективная связь между физическими структурно-энергетическими параметрами и обычными механическими свойствами прочности и деформационными характеристиками материала. Для этого был выполнен анализ свойств реологических функций напряжений $\sigma(t)$ и деформаций $\varepsilon(t)$, полученных экспериментально на малой скорости деформирования стали при растяжении до разрушения. В работе использована деформационная реологическая диаграмма одноосного растяжения материала, аналитически исследованы свойства функций скорости и ускорения относительных необратимых пластических деформаций формоизменения тела. В результате аналитически получены обобщенные формулы для оценки начальных значений структурного физического параметра γ_0 и энергии активации разрушения U_0 материала.

Используя разработанные теоретические методы, уравнения стационарной ползучести, физические уравнения и зависимости структурно-энергетической теории прочности, выполнена теоретическая оценка начальных структурно-энергетических физических параметров прочности конструкционного материала. Определены начальный структурный параметр γ_0 , энергия активации разрушения U_0 углеродистой стали.

Используя признанные экспериментальные данные, физические теоретические методы, на примере углеродистой стали, разработана обобщенная аналитическая физическая модель механических испытаний. Получена в общем виде реологическая функция, моделирующая испытания по стандарту ISO 6892-84, позволяющая производить виртуальные испытания одноосного растяжения материала до разрушения.

Таким образом, имея данные о температуре тела T , реологическую функцию реальной нагрузки в истинных напряжениях $S(t)$, начальные физические параметры материала γ_0, U_0 , аналитическими методами физической теории можно определить значения пластических деформаций, поврежденность, прогнозируемое время до разрушения и др.

В физической теории так же рассмотрены дополнительные важные физико-механические параметры и свойства процесса необратимого деформирования вплоть до состояния разрушения материала.

В работе применен теоретический анализ и обобщение свойств силовой и деформационной реологических диаграмм одноосного растяжения материала. Получена методика построения обобщенной реологической диаграммы стандартного процесса $S(t)$, с помощью которой физическими методами можно определить стандартные характеристики предел пропорциональности $\sigma_{0.2}$ (пластические деформации $\epsilon_r = 0.02\%$), предел прочности σ_b , время до разрушения t_* , остаточные деформации ϵ_{r*} , скорость пластических деформаций и др. физико-механические характеристики материала для этого процесса.

Предложен теоретический метод решения обратной физической задачи - расчет механических стандартных характеристик стали, используя физические параметры прочности и реологическую обобщенную модель испытаний на растяжение по стандарту.

Предложены физические и аналитические методы, которые позволяют выполнить теоретический расчет усталостных характеристик при разных частотах и температурах инструментальной, используя начальные физические параметры материала, зависимости теории, разработанные алгоритмы и программы. Показан пример теоретических расчетов простых механических характеристик углеродистой стали, возможности физического теоретического метода исследования процессов деформирования и разрушения твердых тел.

Материалы и методы. Физические параметры и зависимости.

Физическая структурно-энергетическая теория прочности (SET) это результат теоретического развития кинетической концепции прочности (KCS) твердых тел [1]. Концепция хорошо известна, как формула Журкова (1), которая определяет время до хрупкого разрушения материала (долговечность) для постоянных напряжений и температуре:

$$\tau_* = \tau_0 \exp (U_0 - \gamma_0 \sigma) / RT \quad (1)$$

Где, τ_* s - долговечность, $\gamma_0 \text{ m}^3 / \text{mol}$ - структурный параметр материала, τ_0 - период ассоциированных тепловых колебаний атомов тела, $U_0 \text{ J/mol}$ - энергия активации разрушения,

σ , P_a - постоянные напряжения растяжения, R , $J/mol \cdot K$ - газовая постоянная, T , K , постоянная температура. Произведение $\gamma_0 \sigma$ - молярная плотность энергии, по одной из трех компонент главных напряжений DS:

$$W_{Lo} = \gamma_0 \cdot \sigma, J/mol .$$

Формула (1) подтверждена для разных твердых материалов в широком диапазоне напряжений и температур. Концепция Журкова принципиально отличается от предшествующих методов механики DS. Учитываются время действия напряжения, температура, параметры микроструктурного строения DS и др. Концепция использует молярные физические характеристики DS. Ранее молярные параметры, кинетика их изменений, рассматривались исключительно в расчетах химических реакций, материаловедении и др. В концепции причиной элементарных разрушений считается флуктуация энергии атомной связи. Предполагается, что накопление за время τ_* элементарных разрушений связей в материале, до критического уровня, создают условия макроскопического спонтанного хрупкого разрушения тела [1].

Концепция успешно применяется в расчетах прочности элементов конструкций с циклическими и статическими напряжениями [2], ударных, импульсных нагрузках лазера, прочности земной коры и ряд др. [3,4]. Но в этих методиках отсутствует физическое и теоретическое обоснование применения молярных характеристик, обоснованные методы расчета сложного напряженного состояния и переменных напряжений. В (1) основные параметры были приняты как эмпирические.

В структурно-энергетической кинетической теории прочности твердых тел (SET) получено теоретическое обоснование формулы и параметров Журкова (1), обоснована физическая корпускулярно-волновая модель разрушения и необратимого формоизменения DS[Ж]. Физическая теория прочности получена с позиций статистической физики и волновой теории, анализа и теоретического обоснования экспериментальных результатов и эмпирических формул кинетической концепции прочности твердых тел. Разрушение рассматривается как элементарный корпускулярно-волновой процесс периодического обмена энергией, в малых объемах твердого тела, происходящий с характерной высокой частотой. Этот процесс может иметь обратимый и необратимый характер. В классической механике рассматриваются феноменологические модели разрушения гипотетических сил атомных связей в твердых телах (парные потенциалы и др.). В физической теории рассматривается микроскопический процесс взаимодействия элементарных кинетических потоков энергии волн-квантичек де Бройля, возникающих в результате флуктуаций взаимодействия этих волн-квантичек в элементарных малых объемах DS. Рассмотрены элементарные энергетические ассоциированные объемные корпускулярно-волновые взаимодействия элементарных структурных единиц макроскопической среды (в терминах механики - атомные связи). Физическая обобщенная модель объемного взаимодействия структурных единиц применима для твердых тел разной природы, она обоснованно заменяет эмпирическую модель «механических» атомных сил связи.

В физической структурно-энергетической теории прочности [1] DS рассматривается как физическая среда, которая характеризуется макроскопическими механическими, термодинамическими и статистическими корпускулярно-волновыми свойствами и параметрами: молярная энергия, молярный термодинамический потенциал и т.д. В теории получены зависимости, которые связывают физические и обычные механические характеристики DS. Элементарным энергетическим физическим состоянием DS, подобно атомам, являются характеристические флуктуации (CFL - characteristic fluctuation), которые возникают с

характерной частотой, в каждом элементарном молярном объеме среды, в результате взаимодействия микроскопических волн-квазичастиц энергии де Бройля. DS рассматривается как энергетическая трехмерная матрица из CFL, одновременно использованы классические представления теории упругости. CFL характеризуется физическими параметрами: плотность энергии, частота, импульс, скорость, вектор и др. Эти параметры формируют физико-механические свойства и кинетику разрушительных процессов DS во времени и пространстве. В современной механике DS рассматривается малая часть энергии суммарного волнового процесса - акустическая эмиссия. Деформирование, образование свободной поверхности и разрушение в физической теории показано через макроскопические статистические молярные энергетические величины и их производные, свойства которых изменяются с течением времени. В теории обоснованно предполагается, что CFL результат одновременного ближнего и дальнего объемного ассоциированного взаимодействия совокупности волн-квазичастиц де Бройля в теле любой природы. В DS присутствуют микроскопические волны де Бройля с разной частотой, длиной волны, энергией, вектором и др. Вместе они формируют поля температуры и напряжений. Количество CFL измеряется в молях на единицу объема. Моль, в волновой структурно-энергетической кинетической теории, является объективной физической корпускулярно-волновой энергетической характеристикой материальной среды газа и DS. Данный подход расширил классическое определение моля [3] и не противоречит его начальной «механической» трактовке. В этом коротко отличие физической теории прочности от феноменологических методов механики деформированного твердого тела.

В SET предложены новые обобщенные физические параметры состояния DS, производные этих величин, получены функции, из которых следует формула (1). Показана связь физических молярных параметров и механических параметров теории упругости, теоретически получены ряд известных экспериментальных зависимостей механики DS и уравнение состояния идеального газа (как частный случай состояния корпускулярно-волновой термодинамической системы) [6]. Рассмотрим основные физические молярные величины в SET.

Для простоты изложения 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 $\sigma_1(t) = \sigma(t), |\sigma| > 0, \text{Pa}$. В этом случае DS можем характеризовать обобщенными физическими характеристиками.

$Sh(\sigma, t), \text{m}^3 / \text{mol}$ - молярный объем квазичастиц прочности. Объем DS в котором за каждый элементарный малый характерный период времени τ_0 , происходит N_A характеристических периодических флуктуаций энергии взаимодействия волн-квазичастиц де Бройля.
 $N_A = 2.23 \cdot 10^{22} \text{un} / \text{mol}$ число Авогадро.

$$W_L = W_\sigma \cdot Sh, \text{ J/mol}, \quad W_\sigma = \frac{\sigma^2}{2E}, \quad \text{J/m}^3,$$

Где, $W_L(\sigma, t)$ - молярная энергия, функция состояния DS, E – модуль упругости.

$$Gr = 0,25\sigma \cdot Sh(\sigma, t), \quad \text{J/mol}.$$

Где, Gr - структурно-энергетический потенциал, физико-механическая характеристика состояния твердого тела.

$$Gr(t) = 0.5E \cdot \gamma_r(t), \quad Gr_0 = 0.5E\gamma_{r0}, \quad \gamma_0 = Sh(t=0, \sigma=E)$$

$\gamma_r(t, \sigma)$ - корневой молярный объем DS, структурная функция материала [6,7]. Функция состояния $Gr(\sigma, T, U_0, Gr_0, t)$ отражает процесс влияния механической, тепловой нагрузки на необратимые изменения материала [6,7]. Начальное значение Gr_0 , для чистых металлов, многих твердых тел определяется по методике Журкова [2,3]. Для конструкционных материалов величина Gr_0 определяется в SET аналитическими методами, путем обработки реологических диаграмм одноосного растяжения материала или данных индентирования по ISO 14577 [7].

Связь между физическими параметрами и механическими свойствами материалов. В SET получены зависимости (3) (4), которые позволяют определять пластические деформации материала в любой момент времени, если задана функция истинных напряжений и начальные физические параметры материала:

$$\varepsilon_r(t) = \int_0^t \frac{RT}{\tau_*(W_L)W_L(t)} dt, \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}_r(t) = \frac{RT}{\tau_*(W_L)W_L(t)}, \quad 1/s. \quad (4)$$

ε_r – накопленные истинные необратимые деформации, $\dot{\varepsilon}_r$ - скорость деформаций для одноосного деформирования. Зависимости (3,4) подтверждены экспериментально [8].

В SET получена зависимость, которая позволяет находить текущее значение параметра $\gamma_r(t)$ для конструкционных материалов путем обработки экспериментальных реологических диаграмм $\varepsilon_r(t)$ [7].

$$\gamma(t) = \frac{RT\partial(\ln\alpha\dot{\varepsilon}_r)}{\partial\sigma}, \quad \alpha - \text{множитель нормировки.} \quad (5)$$

Получена простая формула для аналитической оценки начального значения структурного параметра конструкционного материала γ_0 по данным аналитической обработки реологических диаграмм $\sigma(t)$, $\varepsilon(t)$ в результате одноосного растяжения образца материала.

В SET получен ряд других зависимостей взаимосвязи физических, термодинамических и механических параметров, которые позволяют решать задачи механики DS физическими методами, подтвержденные экспериментальными данными. Например, возможен расчет удельного количества дислокаций, количества тепла, выделяемого при необратимых процессах и т. д. [5,6].

Основное уравнение физической теории.

В SET получены физические уравнение и зависимости для расчета долговечности при нестационарных и сложных нагрузках, относительно разных молярных функций состояния DS [5]. Дифференциальное уравнение (5) записано для структурной функции $\gamma_r(t, \sigma)$, однокомпонентного структурно однородного, стабильного материала, функция истинных напряжений $\sigma(t)$ задана. Уравнение получено автором статьи на основании анализа и обобщения двух признанных независимых основополагающих экспериментов KCS [9].

$$\frac{\sigma d\gamma}{dt} = \frac{RT}{\tau_0} \exp\left(\frac{\gamma_0\sigma - U_0}{RT}\right), \quad j/s \cdot \text{mol}, \quad (6)$$

Граничные условия: U_0, γ_0 . Физическое условие разрушения:

$$U_0 - \gamma(t)|\sigma(t)| = 0, \quad T = \text{const}$$

В СЭТ разрабатываются далее физические методы учета влияния на прочность и долговечность факторов всестороннего давления, радиации, электрического тока, получены ряд формул для оценки этих факторов на долговечность и др.

На примере анализа свойств экспериментальной реологической диаграммы углеродистой стали покажем возможности физической теории решать аналитически задачи оценки стандартных механических характеристик, поврежденность материала, определять измененные стандартные характеристики поврежденного материала, усталостные свойства, долговечность и др. для переменных напряжений, температуры материала. Используем уравнения, зависимости теории, разработанные программы для решения уравнений физической теории. Эти программы позволяют видеть значения физических параметров прочности, скорость их изменения под разными нагрузками и др.

Результаты. Метод теоретического определения начальных физических параметров стали 45. Используем реологические диаграммы медленного растяжения образца, силовую $\sigma(t)$, Рис.1,А. и деформационную $\varepsilon(t)$, Рис.1,В. Они получены на специальной испытательной машине [10]. Скорость деформаций на начальном участке $\dot{\varepsilon} = 0,53 \cdot 10^{-4}, s^{-1}$. Продолжительность процесса деформирования около 1000с. Процесс изотермический. Для сравнения схематически рядом показаны обычные реологические кривые $\sigma(t)$, $\varepsilon(t)$ полученные по методике ISO6892-84, записаны во времени, до момента разрушения образца. Время стандартного процесса 2-5 секунд до разрушения. Параметры испытания записаны в цифровой форме и таблицах Excel от времени.

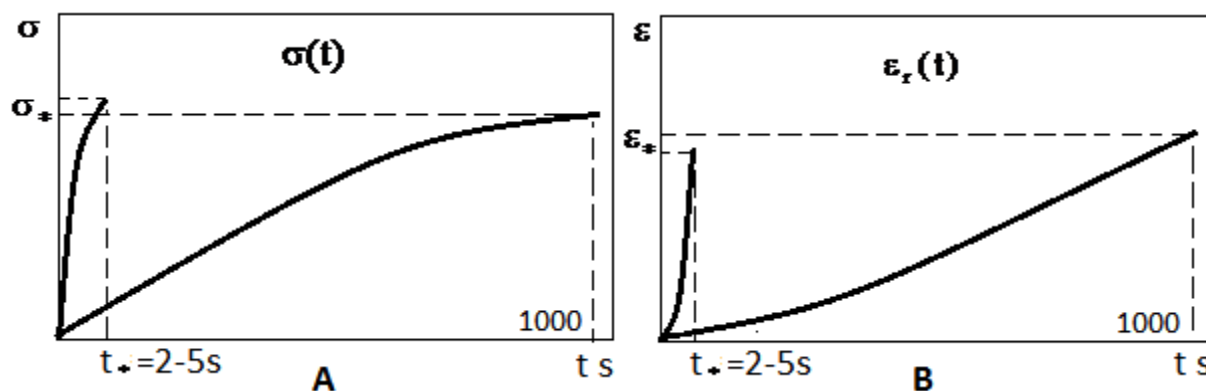


Рис.1. Условные реологические диаграммы растяжения образца до разрушения, t_* - стандартное время процесса до разрушения 2-5s. 1. $\sigma(t)$ силовые диаграммы, 2. $\varepsilon_r(t)$ деформационные диаграммы.

Используя эти результаты эксперимента, уравнения (3,4), физическое уравнение (5) и зависимость (6), выполнена теоретическая оценка структурно-энергетических физических параметров прочности стали 45.

Определены начальный структурный параметр $\gamma_0 = \gamma(t_{02}) = 1,23 \div 1,28 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{mol}$. Энергия активации разрушения $U_{o1} = 1,38 \cdot 10^5 \text{ j/mol}$ - до предела текучести, $U_{o2} = 2,05 \cdot 10^5 \text{ j/mol}$ - до предела прочности. Используя полученные физические параметры, теоретически решена обратная задача, построена исходная деформационная диаграмма, определены основные параметры деформирования растяжением стали 45 до разрушения для заданной функции напряжений согласно ISO6892-84 [11]. И так, выполнена проверка на первом этапе расчетов.

Оценка стандартных механических характеристик по ISO6892-84, используя начальные физические параметры материала. Методами физической теории выполнена оценка пределов пропорциональности и прочности, остаточных деформаций стали 45. Использована аналитическая связь механических характеристик прочности и физических параметров прочности стали 45. Использованы начальные физические структурно-энергетические параметры γ_0 , U_0 полученные ранее. Применена обобщенная модель реологической диаграммы напряжений для одноосного растяжения стали до разрушения, обеспечивающая необходимую среднюю скорость относительных деформаций материала $\dot{\varepsilon} = 1,375 \cdot 10^{-3} \text{ 1/s}$, по стандарту ISO6892-84. Результаты расчетов:

$$\sigma_{02} = 449, \text{ МПа, предел пропорциональности; } t_{02} = 1,56, \text{ s; } \varepsilon_{r02} = 0,0021 (0.21\%);$$

$S_* = 1060 \div 1200$ МПа, R_a истинный предел прочности; $t_* = 3,7-4,4$ с, время до разрушения; $\epsilon_{r*} = 0,16 - 0,22$, остаточные деформации при разрушении; $\sigma_B = 778$ МПа, условный предел прочности.

Экспериментальные характеристики углеродистой стали 45, в состоянии поставки [12]: предел прочности $\sigma_B = 748$, МПа, истинный предел прочности $S_* = 1173$, МПа; $\sigma_{02} = 412 \cdot 10^6$ Па. Остаточное удлинение 19%.

Теоретическая оценка параметров усталости стали 45, для заданных различных циклических напряжений, температурных режимов.

Используя зависимости физической теории (2-5), начальные молярные физические параметры стали 45, аналитически моделированы усталостные испытания материала ISO 14577-1:2002 [14], определен предел выносливости σ_{-1p} углеродистой стали 45 [7]. Выполнена оценка влияния частоты нагрузки, температуры на долговечность, предел выносливости. Рис.2. Результаты согласуются со справочными характеристиками материала, подтверждают адекватность предложенной физической модели усталостного разрушения. Справочная характеристика предела выносливости стали 45 (ГОСТ 1497-84) $\sigma_{-1p} = 190-250$ МПа (пульсации растяжения).

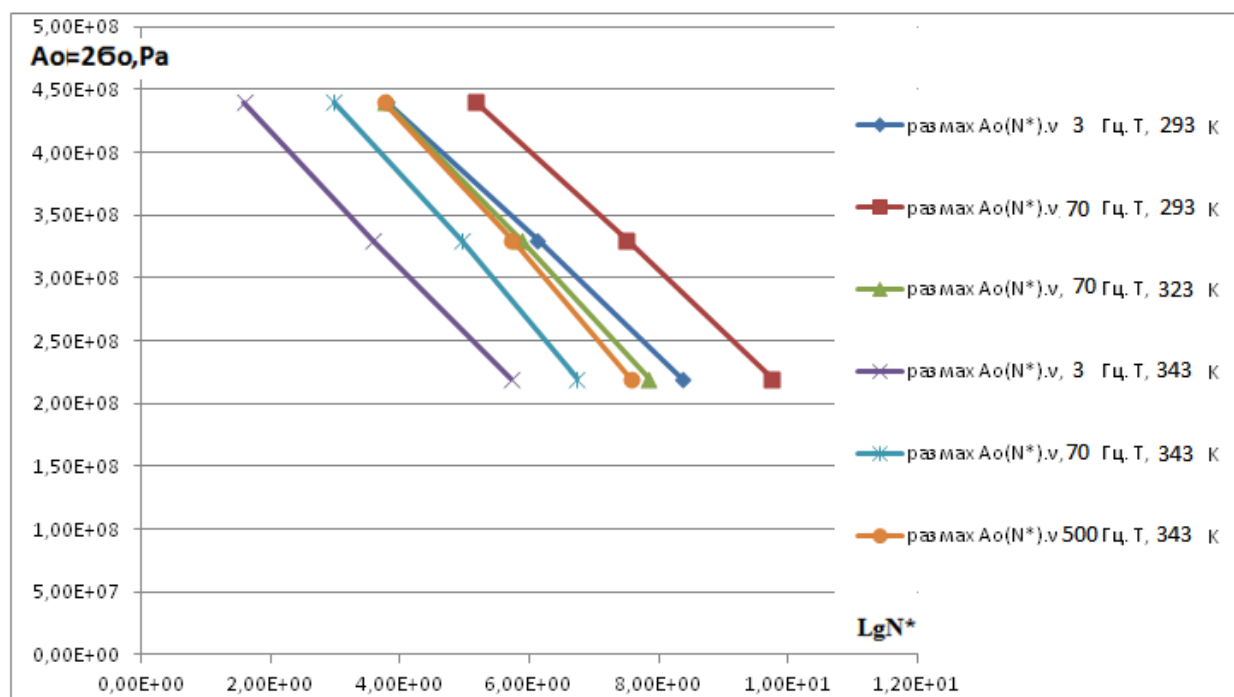


Рис.2. Зависимости амплитуды размаха циклических напряжений растяжения A_0 от числа циклов до разрушения материала N_* . 1. Частоты 3, 70, 500 Гц. Температура: 293 (20), 323 (50), 343(70) °К, в скобках температура по Цельсию. Форма напряжений цикла одноосного растяжения $\sigma(t) = \sigma_0(1.001 - \cos B_s t)$

Идентификация. Используя реологические диаграммы индентирования, в СЭТ выполнены исследовательские расчеты физических и стандартных механических характеристик прочности сталей 45, 15X2НМФА. Используются методы физической теории, учтены дополнительные физические параметры процесса, на основе данных инструментированного индентирования согласно ISO 14577-1.2002. В работе использованы экспериментальные данные, полученные на установке UTM -20НТ [13] для инденторов Бринелля и Виккерса. Предложен общий физический аналитический метод анализа и обработки результатов испытаний, с различным инструментом и усилием индентирования. Метод предназначен для приближенной оценки физических параметров материала и стандартных механических характеристик прочности. Этим методом, используя упрощенную модель DS, определены предел прочности, текучести сталей 45, 15X2НМФА.

Обсуждение.

Модель DS как физической среды состоящей из квазичастиц молярной энергии CFL, позволила одновременно сформировать понятие внутренней и внешней физической поверхности, физической внешней и внутренней границы тела, они позволяют аналитически описать процессы необратимого формоизменения (пластического деформирования), образования свободной поверхности (дефект, трещина, разрыв), теплообразования, вплоть до хрупкого разрушения тела [5,6]. Зависимости теории подтверждены известными эмпирическими формулами механики DS и кинетической концепции прочности. Физические свойства молярной структурно-энергетической модели деформирования и разрушения тела, в определенном смысле универсальны, применимы для описания разрушения тел разной физической природы (аморфное, кристаллическое и др.). Для описания процессов в DS используется физическое уравнение равновесия молярной энергии. В теории установлена связь физических параметров, с параметрами механики DS. Рассматриваются физические энергетические характеристики: молярная энергия (молярный термодинамический потенциал), молярный объем, формоизменение молярного объема, их производные мощность, скорость процесса и др. физические параметры DS. Из волнового уравнения равновесия молярной энергии вытекают известные экспериментальные физические кинетические уравнения и зависимости (и наоборот), характеризующие состояние идеального газа и идеального твердого тела. Теория рассматривает реологические (во времени) характеристики процессов. Установлена связь макро параметров напряжение, давление, температура, объем, площадь свободной поверхности, с микроскопическими статистическими энергетическими физическими параметрами атомарного уровня.

Выполненные расчеты показывают физическую картину связи механических параметров пластического деформирования материала и физических параметров деформированного твердого тела. Показана принципиальная возможность применения новых физических методов, вместо феноменологических подходов, при решении задач механики ДТТ. Возможен более точный и детальный расчет механических параметров и физических характеристик ДТТ. Для этого необходимо производить расчеты физических параметров по всей диаграмме деформирования, использовать другие более сложные методы численного решения.

Выводы. Располагая реологическими диаграммами истинных напряжений $S(t)$ и деформаций $\epsilon(t)$, процесса растяжения образца материала (осциллограммой, таблицей и др.) до разрушения, или результатами индентирования по методу ISO 14577-1.2002, можно аналитически физическими методами определить начальные физические параметры прочности материала, затем определяем стандартные характеристики прочности и усталости, моделируя стандартные процедуры испытаний. Физическими методами возможна теоретическая оценка параметров прочности, усталости, долговечности материала для произвольной заданной функции напряжений и температуры. Возможен теоретический учет влияния дополнительных физических факторов на процесс накопления повреждений в материале.

Разработанные теоретические и программные методы позволяют выполнять оперативную оценку состояния физических и механических параметров материала непосредственно в элементах конструкции действующих машин и механизмов. Для этой цели можно использовать соответствующие датчики контроля параметров деформаций, температуры и др. Данные можно накапливать и сохранять, использовать режим связи с устройствами обработки информации, обеспеченными соответствующими программными алгоритмами физических расчетов параметров состояния материала.

Заинтересованным организациям предлагаем совместную дальнейшую разработку, использование предложенных физических методов расчета, программ, для анализа и контроля состояния прочности, поврежденности элементов конструкций динамичных устройств, машин в сложных нестационарных условиях и эксплуатации.

Литература

1. Журков С.Н. К вопросу о физической основе прочности. ФТТ т.22 , №11, стр.3344-3349. 1980г.
2. Петров М.Г. О деформировании и разрушении алюминиевых сплавов с позиций кинетической концепции прочности / М.Г. Петров, А.И. Равикович // ПМТФ. 2004г. Т.45. №1. 151-161 с.
3. Карташов Э.М. Современные представления кинетической термофлуктуационной теории прочности полимеров. // М.: ВИНТИ. Итоги науки и техники. Серия Химия и технология. ВМС. 1991. т.27. С.3-111.
4. Потапова Л.Б., Ярцев В.П. Механика материалов при сложном напряженном состоянии. Москва. Машиностроение -1. 2005г. 244с.
5. Штырёв Н.А. Деформирование и разрушение твердых тел с позиций кинетической структурно-энергетической теории прочности / Н.А. Штырёв // 5^я Международная конференция механика разрушения и прочность материалов. 2014. Львів. с.63-70.
6. Штырёв Н.А. 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 <http://energydurability.com>
7. 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. <http://energydurability.com>
8. Регель В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Г. Томашевский. Наука. Москва , 1974г. 560с.
9. Штырёв Н.А. Определение физических условий разрушения поликристаллических тел при нестационарном циклическом растяжении [Текст]/ Сборник научных трудов. Строительная механика корабля. Николаев, НКИ. 1987г., с. 74-84.
10. Дегтярев В.А. Влияние предварительного пластического деформирования на механические характеристики стали 45и сплава Д16Т при статическом и циклическом нагружении. Проблемы прочности. 2005, №4 с33-45.
11. ISO 6892-1:2009 Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature
12. Гладков В.М. Кудрявцева А.А, Сухин В.И. О соотношении между статическими и механическими характеристиками и импульсным напряжением в металлических стержнях. ПМТФ, №5, 1977, с.135-137.
13. В. В. Харченко, Н. П. Рудницкий, О. А. Каток, А. Н. Неговский, А. В. Дроздов, В. В. Кутняк УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ИНСТРУМЕНТИРОВАННОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ. Надійність і довговічність машин і споруд, 2007. Вип. 28 с.140-147.
14. ISO 14577-1:2002. Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Test method.