

ОЦЕНКА МЕТОДАМИ СТРУКТУРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ, ДОЛГОВЕЧНОСТИ, ПОВРЕЖДЕННОСТИ МАТЕРИАЛА ПОДВЕРЖЕННОГО НЕСТАЦИОНАРНЫМ НАГРУЗКАМ

Н.А. Штырёв

Частная научно-производственная фирма «ЛЮ» г. Николаев Украина

Are shown physical quantities and parameters, equation of state, dependence, which characterize the properties of strength and destruction of materials in the structural- energy kinetic theory of strength. Using the obtained dependences, examples of the calculation of strength, damage, fatigue, longevity, plastic deformation of construction materials are shown.

Создание обобщенного физического метода решения задач хрупкого, пластического разрушения материалов под влиянием различных факторов и нестационарных нагрузок является актуальной задачей теории прочности и механики деформированного твердого тела. В теории физических процессов разрушения материалов успешно применяется кинетическая концепция прочности [1,2,3]. Однако в эмпирической формуле Журкова для оценки долговечности материала при постоянных напряжениях, нет объяснения физической сути структурно коэффициента материала γ , отсутствует теория перехода от постоянных одноосных напряжений к нестационарному и сложному напряженному состоянию деформированного твердого тела (далее ДТТ) [1,2].

В структурно-энергетической кинетической теории предложены обобщенная физическая модель деформирования и разрушения, новые методы аналитического решения задач прочности и механики разрушения [4,5]. ДТТ рассматривается как конденсированная физическая среда из идеальных структурных единиц (СЕ). Которые находятся в трехмерном поле энергии микроскопических волн, вызванных флуктуациями, разрушающими термодинамическое равновесие ассоциированных атомных связей в каждом элементарном молярном объеме тела. Элементарный молярный объем ДТТ это микроскопический источник-сток (пульсирующий диполь) энергии от разрушительной характеристической физической флуктуации. В линейном приближении энергия разрушительной флуктуации за характерный период времени представляет квазичастицу (фонон), энергии разрушенных связей. Квазичастицы несут кинетическую тепломеханическую энергию разрушения ДТТ. Совокупность квазичастиц как матрица идеальных источников энергии разрушительных флуктуаций, образует поле и картину потока механических напряжений. Используя физическую теорию неравновесных состояний, векторную теорию поля, кинетическую концепцию, показано, моль это физическая статистическая макроскопическая количественная мера энергии микроскопического элементарного движения возникающего от флуктуаций разрушающих термодинамическое равновесие в конденсированной среде [4]. Молярные характеристики отражают энергетические статистические процессы разрушительных флуктуаций на структурно-атомарном уровне конденсированных сред. Используя свойства функций молярной энергии разрушительных флуктуаций в деформированном твердом теле, теоретически обоснованы формула Журкова, структурный коэффициент материала, аналитически получены экспериментальные зависимости концепции и механики пластического деформирования ДТТ [5]. Обоснован переход к нестационарному и сложному напряженному состоянию [3]. ДТТ рассматривается как термомеханическое квазиравновесное состояние макроскопической системы квазичастиц возникающих от флуктуаций разрушающих прочные структурные связи и термодинамическое равновесие. Физические свойства системы зависят от времени, параметров ДТТ, температуры и микропараметров разрушительных характеристических тепловых флуктуаций в элементарных молярных объемах. Начальные значения структурно-энергетических физических параметров материала определяются экспериментально. В

теории получены зависимости от напряжений, температуры и времени, для расчета текущих значений структурных параметров состояния ДТТ, необратимых деформаций, микроскопических повреждений, теплообразования, условий макроскопического разрушения. Физическая энергетическая модель разрушения заменяет механическую идею «перенапряженных связей» между атомами [1,3]. Этот подход является теоретическим развитием кинетической концепции и обобщением результатов других теоретических работ [4].

Цель работы, показать новые физические величины, параметры и зависимости теории, рассмотреть на примерах принципы нового обобщенного метода расчета прочности, долговечности, усталости, поврежденности, деформирования, скорости разрушения, при различных одноосных нагрузках. Показать универсальный характер определяемых молярных структурно-энергетических кинетических физических параметров ДТТ, связь с обычными параметрами предел текучести, прочности, усталости, долговечности, поврежденности и др.

Рассмотрим, в первом приближении, ДТТ как гетерогенную однофазную (трехмерная фаза) однокомпонентную термодинамическую систему, прочный изотропный конгломерат идеальных структурных единиц. Функция напряжений $\sigma(t)$, $|\sigma| > 0$ задана. Опираясь на эксперименты и теорию, для одной компоненты тензора получена зависимость [6]:

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

Где, $W_L(\sigma, t)$ - молярная энергия ДТТ, $Sh(\sigma, t), \text{m}^3 / \text{mol}$ - молярный объем квазичастиц микроскопической энергии от разрушения (необратимого изменения) прочности структуры деформированного твердого тела, $W_\sigma(\sigma, t), \text{J/m}^3$ - плотность энергии упругих деформаций по одной компоненте тензора главных напряжений, $W_\sigma = \sigma^2 / 2E$. E - модуль упругости. В работах [4,6] экспериментально и теоретически обоснован физический закон состояния ДТТ:

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

Где, Gr - структурно-энергетический физический параметр, потенциал молярной энергии прочных корневых энергетических связей в материале. Это количество молярной энергии микроскопического движения, возникающего в элементарном молярном объеме ДТТ за период характеристической разрушительной флуктуации τ_{r0}, s , при напряжении равном $\sigma = E$. Коэффициент Журкова γ связан зависимостью с параметром $Gr = \gamma \cdot E$ [6]. Структурно-энергетическая функция $Gr(\sigma, T, U_0, Gr_0, t)$ контролирует необратимые процессы под действием механической и тепловой нагрузок, деформации и элементарные физические разрушения в ДТТ [6]. Начальное значение Gr_0 определяется по методике Журкова экспериментально или аналитически [2,3]. $U_0 \text{ J/mol}$ - энергия активации разрушения, теоретическая величина молярной энергии необходимая для хрупкого разрушения за время порядка $\tau_0 = 1 \cdot 10^{-13} \text{c}$ [2,3]. В [5] получено уравнение равновесия молярной энергии для произвольной функции одноосных напряжений. Для одной компоненты главных напряжений $\sigma(t)$, в условиях $T = \text{const}$, уравнение состояния ДТТ имеет вид:

$$\frac{dGr}{dt} - \frac{ERT}{\sigma \tau_0} \exp \frac{Gr - U_0}{RT} = 0, \quad Gr(t) = W_L \frac{E}{\sigma}, \quad |\sigma| > 0 \quad (2)$$

Граничные условия $U_0, Gr(0) = G_0$. Физическое условие разрушения [4]:

$$U_0 - W_L = 0, \quad W_L = Gr(t) \frac{\sigma}{E} = \gamma \cdot \sigma. \quad (3)$$

Где, t_* - время под нагрузкой до состояния разрушения. Общий интеграл (2) не удалось получить. Для случая $\sigma = \text{const}$, в явном виде, получены молярные функции и параметры состояния ДТТ: $W_L(\sigma, t)$, $Sh(\sigma, t)$, $Gr(\sigma, T, U_0, Gr_0, t)$, $I_R(\sigma, t)$, $J/\text{mol} \cdot \text{s}$ - абсолютная скорость повреждений (разрушений), $I_r(\sigma, t)$, $1/\text{s}$ - относительная скорость повреждений (разрушений), $\varepsilon_r(t)$ - необратимые деформации.

Задаем функцию $\sigma(t)$, решения (2) находим численными методами. Молярная энергия инвариантна знаку напряжений, $\sigma(t)$ берем по абсолютной величине [6]. Параметр Gr учитывает историю нагрузки, характеризует измененные свойства материала.

Рассмотрим примеры решений (2) для разных случаев нагрузки. Молярные функции отражают физические процессы разрушений, позволяют аналитически получить зависимости параметров для процессов разрушения и деформирования. На этом основании получены формула Журкова, зависимости для необратимых деформаций, скорости ползучести, долговечности, скорости роста свободной поверхности, количества повреждений (дислокаций в металлах), функция теплообразования и др. параметры разрушения и необратимого деформирования. По текущему значению параметра Gr можно аналитически определить измененные механические показатели прочности, ожидаемое время разрушения для заданной функции напряжений. Основные зависимости подтверждаются известными эмпирическими формулами механики ДТТ.

Обобщенная формула долговечности Журкова [1,5]:

$$\tau_* = \tau_0 e^{\frac{U_0 - W_{L0}}{RT}} \text{ s}, \quad W_{L0} = \frac{\sigma}{E} Gr_0 = \gamma_0 \sigma, \quad \sigma = \text{const}, \quad \tau_0 \text{ параметр нормировки.}$$

Получена и экспериментально подтверждена структурно-энергетическая функция [6]:

$$Gr(t) = \gamma(t)E = \frac{E}{\sigma} \left[U_0 - RT \ln\left(\frac{\tau_{*0} - t}{\tau_0}\right) \right] \text{ J/mol}, \quad \sigma = \text{const}$$

Универсальная физическая \ln ге (на деле) характеристика прочности, долговечности [5], однозначно связана с механическими параметрами прочности материала:

$$I_r = \frac{Gr'}{Gr} = \frac{RT}{\tau_*(W_L)W_L(t)}, \text{ 1/s}$$

Суммарные истинные необратимые макроскопические деформации:

$$\varepsilon_r(t) = \int_0^t \frac{1}{\tau_*(W_L)W_L(t)} dt = \int_0^t I_r dt,$$

Скорость истинных необратимых деформаций, для одноосного деформирования:

$$\dot{\varepsilon}_r(t) = \frac{RT}{\tau_*(W_L)W_L(t)} = \varepsilon_{r0} \exp \frac{\sigma Gr / E - U_0}{RT}, \text{ 1/s.}$$

Параметр установившейся ползучести $\varepsilon_{r0} = \frac{RT}{\tau_0 Gr} \frac{E}{\sigma}$, для чистых металлов он соответствует экспериментальным значениям [3].

Удельная работа Q_1 образования тепла при деформировании материала. Расчеты по приведенной формуле дают удовлетворительные совпадения с экспериментами [8]:

$$Q_1(t) = U_0 \int_0^t \frac{RT}{\tau_*(W_L)W_L(t)\gamma_r(t)} dt, \text{ J/m}^3.$$

Рассмотрим разрушение образца нагрузкой постоянного веса. Решая (2) численными методами, находим значения функций $G(\sigma, t)$, деформации $\epsilon_r(t)$, истинные $\sigma(t)$, время до разрушения τ_* . Для образцов сплавов Д16Т, 1201Т1 аналитически построены кривые необратимых истинных деформаций растяжения $\epsilon_r(t)$, получены ϵ_{r*} , τ_* , результаты расчетов соответствуют данным испытаний [2].

Решая (2) получены кривые малоциклового усталости для пульсирующей нагрузки меди, Ст20. Расчет для X18Н9Т сопоставлен с экспериментальной кривой для аналога стали А517 [7].

Выполнен расчет циклов до разрушения малоциклового пульсирующей нагрузки блоками разной амплитуды. Результаты согласуются с данными экспериментов [8]

Получены хорошие результаты сопоставления экспериментальных данных [2] и численного решения (2), зависимости предела прочности от разной скорости растяжения алюминиевых сплавов линейно возрастающими напряжениями $\sigma = kt$, k - параметр.

Выполнен анализ и сопоставление расчетных и экспериментальных данных по разным контролируемым параметрам: влияние скорости, частоты, ползучести, долговечности, разогревания, образования дислокаций для некоторых материалов. Результаты подтверждают универсальный характер данного подхода [8]

Получены уравнения состояния для сложного напряженного состояния однокомпонентного ДТТ. Используя уравнение состояния, данный подход можно использовать для оценки прочности многокомпонентной среды (сплавы и др.) [2,5].

Предлагаемый подход расширил возможности теоретических методов оценки прочности, механики разрушения, материаловедения, сократил число контролируемых механических параметров прочности [2,5]. Структурно-энергетические кинетические параметры и зависимости позволяет решать разные задачи прочности, учитывать с физических позиций влияние поверхности, внешней среды, масштабный фактор и др.

1. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел / С.Н. Журков Вестник // АН СССР №3 1968г.с.46-52.
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. Регель В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Г. Томашевский. Наука. Москва, 1974г. 560с.
4. Штырёв Н.А. Атомарно-структурная кинетическая модель, молярная энергия и мощность разрушения конгломерата деформируемого твердого тела. / Н.А. Штырёв «Энергия долговечности». №3. 2013г <http://energydurability.com>
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. Функция структурного состояния деформированного твердого тела кинетической концепции прочности / Н.А. Штырёв «Энергия долговечности». №1. 2013г <http://energydurability.com>
7. Дебук И. Влияние средних напряжений и деформаций на малоцикловую усталость сталей А517, А201 / И. Дебук, И. Ванасе, А Бирон // Конструирование и технологии машиностроения: Тр. Американского общества инженеров механиков. 1970. №1. с. 38-51
8. 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>