

На правах рукописи



КОСТИНА Анастасия Андреевна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛАНСА ЭНЕРГИИ ПРИ НЕУПРУГОМ
ДЕФОРМИРОВАНИИ И РАЗРУШЕНИИ МЕТАЛЛОВ И
СПЛАВОВ**

01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь.

Научный руководитель: ПЛЕХОВ Олег Анатольевич, д.ф.-м.н., профессор РАН

Официальные оппоненты: Майер Александр Евгеньевич, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой общей и прикладной физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Челябинский государственный университет».

Семенов Артем Семенович, к.ф.-м.н., доцент, Санкт - Петербургский государственный политехнический университет, кафедра прикладной механики и процессов управления.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

Защита состоится «» 2016 г. В ___ ч. ___ мин. на заседании диссертационного совета Д 002.075.01 при Институте проблем машиноведения РАН по адресу: 199178, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, Большой пр., д. 61

С диссертацией можно ознакомиться в ОНТИ Института проблем машиноведения.

Автореферат разослан «___» _____ г.

Учёный секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

В.В. Дубаренко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Необходимость повышения экономической эффективности разработки современных машин и механизмов требует перехода от натурального к виртуальному проектированию и введения в инженерную практику таких понятий, как компьютерная модель изделия или электронный прототип. Получение достоверных результатов на основе виртуального проектирования требует создания адекватных моделей деформирования и разрушения материала, описывающих процессы эволюции его структуры. При этом разрабатываемые модели должны иметь простую алгоритмическую реализацию и быть адаптированными для использования в коммерческих конечно-элементных пакетах.

Одним из перспективных подходов к построению моделей деформирования и критериев разрушения материала является подход, основанный на анализе баланса энергии в материале в процессе его деформирования. Диссертационная работа посвящена анализу существующего состояния развития моделей деформирования и разрушения металлов, описывающих процессы накопления энергии в материале, построению модели упруго-пластического деформирования и разрушения металлов и сплавов, позволяющей описывать эволюцию структурных дефектов в материале на основе принципов термодинамики необратимых процессов и ее адаптации для использования в конечно-элементном пакете Simulia Abaqus.

Степень разработанности темы исследования. При создании термомеханических моделей неупругого деформирования металлов необходимо учитывать тот факт, что только часть работы пластической деформации превращается в тепловую энергию, вызванную движением и аннигиляцией дефектов различных структурных уровней. Оставшаяся доля энергии запасается в упругих полях дефектов.

Начало исследования вопроса накопления энергии в металлах при неупругом деформировании было положено в работах А. Треска, G.I. Taylor, W.S. Farren и M.A. Quinney. В 60е-80е годы прошлого столетия значительный вклад в развитие данной тематики внесли такие советские ученые, как В.Е. Панин, М.А. Большанина, В.В. Федоров, В.С. Иванова. Современные экспериментальные исследования в этой области представлены в работах D. Rittel, P. Rosakis, A. Chrysochoos, W. Oliferuk, J. Hodowany, О.А. Плехова. Критерии разрушения, основанные на величине накопленной энергии, развиваются А.Р. Арутюняном, V.V.C. Wan и J.P. Crete.

Еще в 1973 году M.B. Bever отметил, что существует проблема, связанная с большим разбросом величины накопленной энергии для одного и того же материала, полученной разными исследователями. В связи с этим возникает необходимость построения модели, способной предсказывать величину накопленной энергии в процессе неупругого

деформирования металлов с учетом истории деформирования и влияния начальной структуры материала, и объяснять механизмы, ответственные за это явление.

В результате анализа работ J.-L. Chaboche, P. Rosakis, L. Stainnier, M. Brunig, Y. Xiao, J. Chen, D. Helm, S. Dumoulin, A. Saai, M. Gurtin, L. Anand, H. Schreyer можно сделать вывод об отсутствии подхода, обладающего термодинамической строгостью, описывающего эффекты «насыщения» накопленной энергии, и удобного для компьютерной реализации.

Таким образом, проблема построения модели, способной адекватно прогнозировать величину накопленной и диссипированной энергии при неупругом деформировании металлов, до сих пор не является решенной в полном объеме. Особенно актуальным является разработка модели, описывающей баланс энергии при квазистатическом и циклическом нагружениях, как наиболее часто встречающихся в инженерной практике.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка феноменологической модели неупругого деформирования и разрушения металлов, позволяющей рассчитывать баланс энергии в материале при произвольном трехмерном квазистатическом или циклическом нагружении, и ее адаптация для использования в коммерческих пакетах конечно-элементного моделирования.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Определение тензорных параметров, описывающих эволюцию структуры материала, законов их изменения в процессе деформирования и построение термодинамической модели, позволяющей проводить расчет баланса энергии в деформируемом материале.
2. Разработка критериев разрушения материала на основе расчета величины и скорости накопления энергии.
3. Разработка алгоритмов адаптации модели и критерия прочности для использования в конечно-элементном пакете Simulia Abaqus.
4. Расчет баланса энергии при:
 - квазистатическом растяжении образцов из стали 03X18H11, стали 8X18H10, титана OT4-0;
 - зарождении и распространении трещины в образце из стали 08X18H10 при квазистатическом растяжении и в условиях сложного напряженно-деформированного состояния;
 - распространении усталостной трещины в образце из титанового сплава OT4-0.

Научная новизна. Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- построена термодинамическая модель для расчета баланса энергии при неупругом деформировании металлов и сплавов;

- проведен теоретический анализ и построена зависимость, описывающая эволюцию структурного параметра в процессе квазистатического растяжения металла;
- установлена связь между коэффициентом упрочнения и скоростью накопления энергии, описан эффект «насыщения» энергии как предвестник разрушения металла;
- показано преимущество энергетического подхода к описанию скорости распространения усталостной трещины по сравнению с традиционными феноменологическими.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в построении модели деформирования и разрушения металлов, позволяющей определять величину накопленной и диссипированной энергии при различных историях нагружения. Практическая значимость работы заключается в адаптации модели для использования в конечно-элементном пакете, что позволит проводить с ее помощью расчет прочности реальных металлических конструкций. Разработанный математический аппарат позволяет определять скорость диссипации энергии в металлических материалах при деформировании и разрушении. Полученные результаты могут быть использованы как при анализе результатов метода теплового неразрушающего контроля, так и для проведения уточненных расчетов напряженно-деформированного состояния металлов с учетом эффекта саморазогрева.

Методология и методы исследования. В рамках диссертационной работы использовались подходы теории определяющих соотношений для разработки уравнений, описывающих напряженно-деформированное состояние материала и позволяющих рассчитывать баланс энергии. Численное моделирование проводилось методом конечных элементов (FEM) и расширенным методом конечных элементов (XFEM).

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель, позволяющая рассчитывать величины накопленной и диссипированной энергий, с учетом многоосного напряженно-деформированного состояния при квазистатическом и циклическом нагружении металлов и сплавов.
2. Алгоритмы адаптации модели накопления и диссипации энергии и критерия разрушения, основанного на величине накопленной энергии, для использования в коммерческих пакетах конечно-элементного моделирования.
3. Результаты численного моделирования эволюции накопленной энергии и эффекта ее «насыщения» при переходе к макроскопическому разрушению в процессе квазистатического растяжения стали 03X18H11, стали 08X18H10, титана ОТ4-0.
4. Результаты численного моделирования процессов зарождения и распространения трещины в образцах из стали 08X18H10 с использованием критерия разрушения, основанного на величине накопленной энергии.

5. Результаты численного моделирования баланса энергии в вершине усталостной трещины и прогнозирование скорости ее распространения в титановом сплаве ОТ4-0.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обуславливается соблюдением фундаментальных физических принципов при построении модели деформирования, выполнением требований проведения численного эксперимента, хорошим согласованием результатов численного моделирования как с оригинальными экспериментальными данными, полученными в ИМСС УрО РАН, так и экспериментальными данными других авторов.

Результаты работы были представлены на следующих международных и российских научных конференциях: XVII Зимняя школа по механике сплошных сред (18-22 февраля 2013 г., Пермь, Россия), 13th International Conference on Fracture (Beijing, China, 16-21 June, 2013), 7th International Conference on Materials Structure & Micromechanics of Fracture (Brno, Czech Republic, July 1–3, 2013), International Workshop “Failure of Heterogeneous Materials under Intensive Loading: Experiment and Multi-scale Modeling”(10-14 February, 2014, Perm, Russia), XXI Петербургские чтения по проблемам прочности (Санкт-Петербург, Россия, 15-17 апреля 2014), 11th World Congress on Computational Mechanics (July 20-25, 2014, Barcelona, Spain), XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, Россия, 20-24 августа 2015), «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (Томск, Россия, 21-25 сентября 2015).

Личный вклад автора заключается в участии в разработке термодинамической модели для описания баланса энергии в процессе неупругого деформирования металлов, разработке, написании и отладке всех численных алгоритмов, представленных в работе, проведении численных экспериментов и сопоставлении их результатов с результатами других авторов и результатами экспериментов.

Публикации. Результаты диссертации представлены в 11 научных публикациях, проиндексированных в международных системах цитирования и входящих в список журналов, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 153 страницы и содержит 52 рисунка, список цитированной литературы состоит из 128 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обсуждается актуальность диссертационной работы, степень разработанности темы исследования, формулируется цель и задачи, научная новизна, теоретическая и

практическая значимость работы, перечисляются методы исследования, отмечается личный вклад автора, представляются положения, выносимые на защиту, описываются апробация результатов и структура диссертации.

Первая глава диссертации носит обзорный характер. В ней приведены основные экспериментальные и теоретические результаты исследования баланса энергии в металлах и сплавах в процессе их неупругого деформирования.

Во **второй главе** диссертации получены определяющие соотношения для описания неупругой деформации, основанные на обобщении разработанной ранее в ИМСС УрО РАН статистико-термодинамической модели среды с дефектами. Для характеристики дефектной структуры материала вводится тензор плотности дефектов, который определяется усреднением по статистическому ансамблю микросдвигов и совпадает по смыслу с деформацией, обусловленной дефектами. Введение такого параметра позволяет разделить неупругую деформацию на диссипативную (пластическую), связанную с движением дефектов, и структурную, ответственную за зарождение и рост дефектов. Кроме того, тензор плотности дефектов выступает в качестве независимой термодинамической переменной, что позволяет получить термодинамический потенциал системы «твердое тело с дефектами» и, как следствие, определить величину накопленной энергии.

В параграфах 2.1 и 2.2 приводятся основные термодинамические соотношения для описания упруго-пластической среды с дефектами. В параграфе 2.3 рассмотрены общие принципы построения определяющих соотношений для описания процессов неупругой деформации с помощью введения нескольких диссипативных функций, разделяющих процессы пластического деформирования и накопления повреждений.

Параграф 2.4 посвящен построению эволюционных уравнений для пластической и структурной деформаций на основе принципов линейной термодинамики необратимых процессов. В этом случае уравнения для определения скорости пластической деформации $\dot{\varepsilon}^p$ и структурной деформации \dot{p} имеют вид:

$$\dot{\varepsilon}^p = \Gamma_{\sigma} \tilde{\sigma}_d + \Gamma_{p\sigma} \left(\tilde{\sigma}_d - \frac{\partial F}{\partial \tilde{p}} \right), \quad (1)$$

$$\dot{p} = \Gamma_p \left(\tilde{\sigma}_d - \frac{\partial F}{\partial \tilde{p}} \right) + \Gamma_{p\sigma} \tilde{\sigma}_d, \quad (2)$$

где Γ_{σ} , $\Gamma_{p\sigma}$, Γ_p – кинетические коэффициенты, $\tilde{\sigma}_d$ – девиаторная часть тензора напряжений $\tilde{\sigma}$, F – свободная энергия системы «твердое тело с дефектами». Для описания перехода от линейного участка упругости к участку упрочнения, наблюдаемых на экспериментальных

диаграммах растяжения металлов, предложена аппроксимация кинетических коэффициентов в виде функций активации:

$$\Gamma_{\sigma} = \frac{1}{2G\tau_{\sigma}} \frac{1}{1 + \exp(-(|\sigma| - \sigma_2)/a_2)}, \quad (3)$$

$$\Gamma_p = \frac{1}{2G\tau_p} \frac{1}{1 + \exp(-(H(|\sigma|, |p|, \delta) - \sigma_1)/a_1)}, \quad (4)$$

$$\Gamma_{p\sigma} = 0, \quad (5)$$

где τ_{σ} , τ_p – характерные времена релаксации, G – модуль сдвига, $|\sigma|$ – интенсивность тензора напряжений, σ_1, σ_2 – параметры материала, a_1 , a_2 – нормирующие множители.

Условие (5) характеризует независимость процессов пластического деформирования вследствие движения дефектов и структурного деформирования вследствие зарождения дефектов. Из решения статистической задачи поведения ансамблей дефектов и гипотезы соосности между

тензорами $\tilde{\sigma}$ и \tilde{p} следует, что для $\frac{1}{2G} \left(\tilde{\sigma}_d - \frac{\partial F}{\partial \tilde{p}} \right)$ можно записать следующее выражение

$$\frac{1}{2G} \left(\tilde{\sigma}_d - \frac{\partial F}{\partial \tilde{p}} \right) = \frac{1}{\delta} \left[\frac{1}{2G} \tilde{\sigma}_d + \tilde{p} \right] - \left(\frac{f_1(|p|)}{|p|} + 1 \right) \tilde{p}, \quad (6)$$

где δ – параметр структурного скейлинга, $|p|$ – интенсивность тензора структурных деформаций.

Функция $H(|\sigma|, |p|, \delta, p_c)$ рассматривается, как «степень неравновесности» системы и имеет вид:

$$H(|p|, |\sigma|, \delta) = |\sigma| - 2G \left\{ \delta \left[f_1(|p|) + |p| \right] - |p| \right\}. \quad (7)$$

Функция $f_1(|p|)$ определяется соотношением:

$$f_1(|p|) = m|p|^n, \quad (8)$$

позволяющим описывать степенное упрочнение. Параметры m и n – постоянные материала.

Для расчета баланса энергии при неупругом деформировании металлов было получено следующее соотношение:

$$\dot{Q}_p = \tilde{\sigma} : \left(\dot{\tilde{\epsilon}}^p + \dot{\tilde{p}} \right) - \left(\frac{\partial F}{\partial \tilde{p}} - T \frac{\partial^2 F}{\partial T \partial \tilde{p}} \right) : \dot{\tilde{p}} = \dot{W}_p - \dot{E}_s, \quad (9)$$

где T – абсолютная температура, \dot{Q}^p – мощность источников тепла, связанная с неупругим деформированием, \dot{W}^p – скорость работы неупругой деформации, \dot{E}^s – скорость накопления энергии. Тогда, коэффициент Тейлора-Квинни β может быть определен, как:

$$\beta = \frac{\dot{Q}_p}{\dot{W}_p} = 1 - \frac{\left[\frac{\partial F}{\partial \tilde{p}} - T \frac{\partial^2 F}{\partial T \partial \tilde{p}} \right] : \dot{\tilde{p}}}{\tilde{\sigma} : (\dot{\tilde{\epsilon}}^p + \dot{\tilde{p}})}. \quad (10)$$

Параграф 2.5 посвящен модификации уравнений (1)-(2), полученных в разделе 2.4, по аналогии с теорией пластического течения. В результате для описания неупругого поведения материалов, слабо чувствительных к изменению скорости деформации, были получены соотношения:

$$\dot{\tilde{\epsilon}}^p = \frac{\tilde{\sigma}_d : \dot{\tilde{\sigma}}_d}{c \left(1 + \text{Exp} \left(-\frac{|\sigma| - \sigma_2}{a_2} \right) \right) |\sigma|} \cdot \frac{\tilde{\sigma}_d}{|\sigma|} \frac{1}{2G}, \quad (11)$$

$$\dot{\tilde{p}} = \frac{1}{2G\tau_p} \frac{1}{1 + \text{Exp} \left(-\frac{H(|p|, |\sigma|, \delta) - \sigma_1}{a_1} \right)} \left(\tilde{\sigma}_d - \frac{\partial F}{\partial \tilde{p}} \right), \quad (12)$$

где c – параметр материала.

На основе разработанной модели, в параграфе 2.6 проведен теоретический анализ, направленный на определение величины энтропии и структурной деформации при неупругом деформировании металлов по данным эволюции температурных полей. В результате были получены следующие одномерные соотношения, описывающие эволюцию структурной деформации и энтропии образца в процессе квазистатического растяжения:

$$\dot{p}_1 = \frac{\Gamma_p}{2} \left[(\sigma - (1 - \beta)\sigma) - \sqrt{(\sigma - (1 - \beta)\sigma)^2 - \frac{4(1 - \beta)\sigma \dot{\epsilon}^p}{\Gamma_p}} \right],$$

$$\dot{S} = \dot{s}_1(p) + \beta \frac{\dot{W}^p}{T} - \frac{q}{T} + r',$$

где $\dot{p} = \dot{p}_{xx}$ – скорость структурной деформации, $\sigma = \sigma_{xx}$ – напряжение, $\dot{\epsilon}^p = \dot{\epsilon}_{xx}^p$ – скорость пластической деформации, \dot{S} – суммарное производство энтропии, $\dot{s}_1(p)$ – производство энтропии, связанное со структурными изменениями, $q = q_x$ – поток тепла, r' – мощность источников тепла. Предложенный подход проиллюстрирован на примере расчета изменения энтропии и структурной деформации при квазистатическом растяжении образца из арможелеза.

В третьей главе приведено описание разработанных алгоритмов и методов численного моделирования, использованных в данной работе.

Параграф 3.1 посвящен разработке алгоритмов реализации термомеханической модели, полученной во второй главе, и критерия разрушения, основанного на величине накопленной энергии, в пакет конечно-элементного моделирования Simulia Abaqus.

Для определения напряженно-деформированного состояния, возникающего в материале в процессе неупругого деформирования, была использована функция UMAT, реализованная на языке FORTRAN, блок-схема которой представлена на рис. 1.

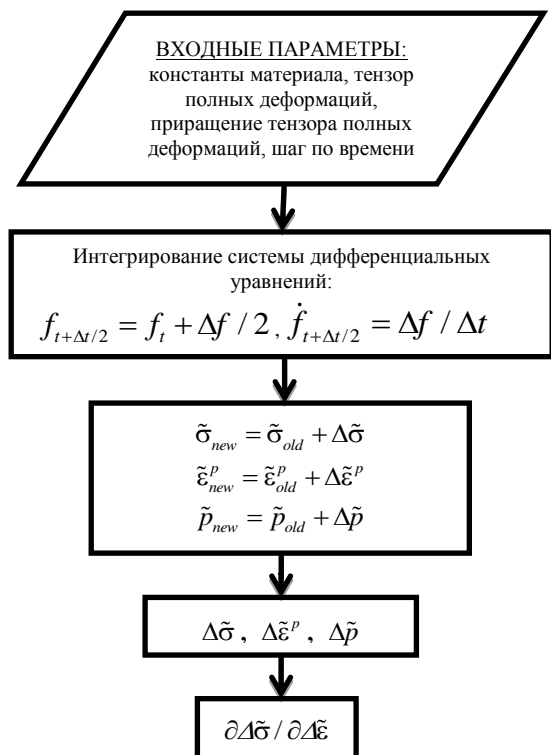


Рисунок 1 – Блок-схема UMAT

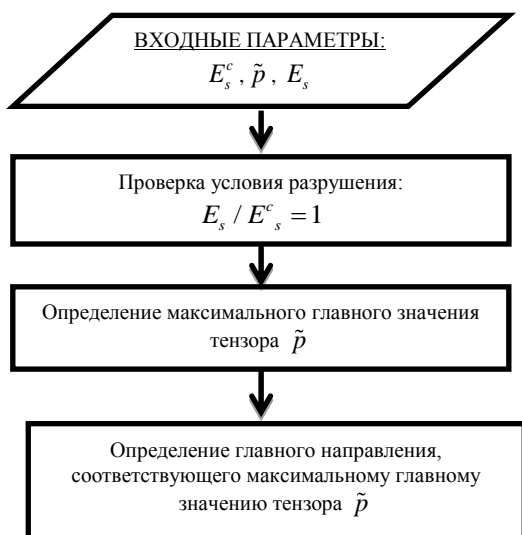


Рисунок 2 – Блок-схема UDMGINI

В качестве неизвестных величин, которые требовалось определить в рамках этой функции, выступали приращения компонент тензоров напряжений $\Delta \tilde{\sigma}$, пластической деформации $\Delta \tilde{\varepsilon}^p$, структурной деформации $\Delta \tilde{p}$, а также якобиана $\partial \Delta \tilde{\sigma} / \partial \Delta \tilde{\varepsilon}$. Для определения приращений использовалось представление дифференциальных уравнений в виде конечно-разностного аналога с помощью метода средней точки. Величины $\Delta \tilde{\sigma}$, $\Delta \tilde{\varepsilon}^p$, $\Delta \tilde{p}$ позволяют рассчитывать значения тензора напряжений $\tilde{\sigma}_{new}$, тензора пластической деформации $\tilde{\varepsilon}_{new}^p$ и тензора структурной деформации \tilde{p}_{new} на новом шаге по времени.

Реализация критерия разрушения, основанного на критической величине накопленной энергии E_s^c , осуществлялась с помощью функции UDMGINI, написанной на языке программирования FORTRAN. Блок-схема процедуры приведена на рис. 2. Нормаль к плоскости разрушения определялась как главное направление, соответствующее максимальному главному значению тензора плотности дефектов.

Параграф 3.2 посвящен описанию расширенного метода конечных элементов (XFEM), используемого в работе для моделирования

процессов зарождения и распространения трещин. Главным достоинством метода расширенных конечных элементов является возможность моделирования процесса распространения трещины без перестраивания сетки с помощью использования дополнительных (разрывных) функций для элементов, содержащих трещину.

В параграфе 3.3 приведено описание методов, используемых в работе для определения параметров линейной механики разрушения, в частности, для расчета J-интеграла. Рассмотрены методы расчета данного параметра в трехмерном и плоском случаях, а также метод податливости, сформулированный Д. Райсом. Проведено сравнение и анализ данных методов на примере расчета J-интеграла для образца с боковой трещиной.

Четвертая глава посвящена численному моделированию процессов диссипации и накопления энергии при деформировании и разрушении металлов, на основе полученных во второй главе соотношений, и алгоритмов реализации, описанных в третьей главе.

Параграф 4.1 посвящен моделированию напряженно-деформированного состояния металлов и сплавов. Для решения этой задачи соотношения (1)-(2) ((11)-(12)), (3)-(8) дополнялись уравнениями для определения полной скорости деформации (13), законом Гука в скоростной форме для шаровой и девиаторной частей тензора напряжений (14)-(15), геометрическим соотношением (16) и уравнением равновесия (17):

$$\dot{\tilde{\epsilon}} = \dot{\tilde{\epsilon}}^e + \dot{\tilde{\epsilon}}^p + \dot{\tilde{p}}, \quad (13)$$

$$\dot{\sigma}_0 = K \dot{\epsilon}_0^e, \quad (14)$$

$$\dot{\tilde{\sigma}}_d = 2G \dot{\tilde{\epsilon}}_d^e, \quad (15)$$

$$\tilde{\epsilon} = \frac{1}{2} (\bar{\nabla} \bar{u} + \bar{\nabla} \bar{u}^T), \quad (16)$$

$$\bar{\nabla} \cdot \tilde{\sigma} = \bar{0}, \quad (17)$$

где $\sigma_0 = \frac{1}{3} \tilde{\sigma} : \tilde{E}$, $\tilde{\sigma}_d = \tilde{\sigma} - \frac{1}{3} (\tilde{\sigma} : \tilde{E}) \tilde{E}$, $\epsilon_0^e = \frac{1}{3} \tilde{\epsilon}^e : \tilde{E}$, $\tilde{\epsilon}_d^e = \tilde{\epsilon}^e - \frac{1}{3} (\tilde{\epsilon}^e : \tilde{E}) \tilde{E}$, $\tilde{\epsilon}^e$ - тензор упругих деформаций, \tilde{E} - единичный тензор, K - модуль объемной упругости, G - модуль сдвига.

Данная система уравнений применялась для расчета зависимости напряжения от деформации при квазистатическом нагружении образцов из стали 03X18H11, стали 08X18H10 и титанового сплава OT4-0, представленными на рис. 3. Результаты моделирования количественно совпадают с экспериментальными данными, полученными в ИМСС УрО РАН и данными, опубликованными другими авторами¹.

В параграфе 4.2 проиллюстрировано применение разработанной модели для описания баланса энергии при квазистатическом нагружении металлов и сплавов. На рис. 4 представлены результаты расчета скорости накопления энергии в зависимости от деформации для стали 03X18H11. Для расчета величины $(1-\beta)$ было использовано соотношение (9). На начальном участке деформирования относительная скорость накопления энергии растёт, достигая

¹ Oliferuk W., Maj M. Energy storage rate in non-homogeneous deformation // Proceedings of the 21st International congress of theoretical and applied mechanics (ICTAM04), 15-21 August, 2004, Warsaw, Poland. – 2005. – P. 11185

максимума, что соответствует росту плотности дефектов в материале. На заключительном этапе деформирования относительная скорость накопления энергии падает, что соответствует преобладанию диссипативных процессов в эволюции структуры материала. Кроме того, рис. 4 иллюстрирует эффект «насыщения» накопленной энергии, который заключается в наличии ниспадающей ветви на кривой $(1-\beta)$, и является предвестником макроскопического разрушения образца.

Исследована взаимосвязь характера упрочнения материала и скорости накопления энергии для стали 03X18H11. Показано, что смена механизмов структурной релаксации материала соответствует смене характера процесса упрочнения. Начальный этап параболического упрочнения соответствует росту относительной скорости накопления энергии в материале, сопровождающимся ростом значения параметра модели, описывающего плотность дефектов. С физической точки зрения это соответствует росту плотности дислокаций в границах и внутри зерен, а также разориентировке зерен и интенсивному накоплению энергии в материале. Ниспадающий участок зависимости скорости накопления энергии связан с преобладанием диссипативных процессов в структуре материала, что с модельной точки зрения описывается преобладанием собственно пластической деформации над структурной.

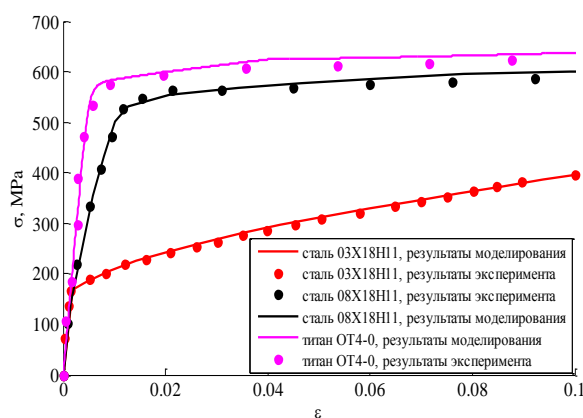


Рисунок 3 – Зависимость напряжения от деформации для стали 03X18H11, стали 08X18H10 и титана ОТ4-0 (сплошные кривые – результаты моделирования, маркерные точки – экспериментальные результаты)

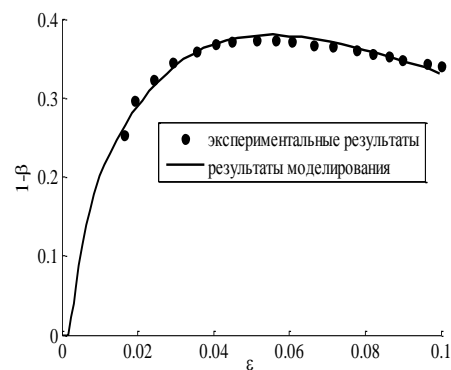


Рисунок 4 – Зависимость скорости накопления энергии от деформации для стали 03X18H11 (сплошная кривая – результаты моделирования, маркерные точки – экспериментальные результаты)

Для образца из стали 08X18H10 проведен расчет накопленной энергии в зависимости от величины деформации с помощью модели, описанной во второй главе, и геометрического

метода, основанного на анализе деформационной кривой². Результаты расчета подтвердили тот факт, что геометрический подход позволяет получить только часть накопленной энергии, связанную с неоднородной деформацией.

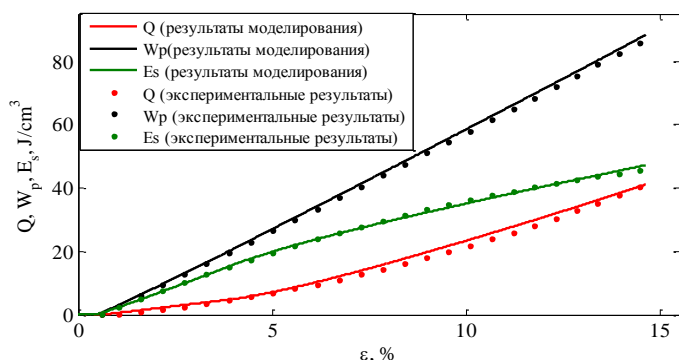


Рисунок 5 – Зависимость работы пластической деформации, накопленной и диссипированной энергий от деформации для титана OT4-0 (сплошные кривые – результаты моделирования, маркеры – экспериментальные данные)

На рис. 5 представлены величины работы пластической деформации, накопленной и диссипированной энергий, полученные при моделировании квазистатического растяжения титанового сплава OT4-0. Баланс энергии в образце рассчитывался согласно уравнению (9). Модель позволила описать экспериментальные результаты, согласно которым, значительная часть работы пластической деформации запасается в материале.

В параграфе 4.3 приведены примеры применения расчета величины накопленной энергии для задач разрушения металлов. Рассмотрено моделирование зарождения и распространения трещины при квазистатическом растяжении гладкого образца из стали 08X18H10 на основе критерия достижения скорости накопления энергии нулевого значения. Показана возможность применения разработанных алгоритмов расчета для моделирования множественного зарождения трещин и отклонения пути трещины от прямолинейного распространения (рис. 6-7).



Рисунок 6 – Результаты моделирования отклонения трещины от прямолинейного пути распространения



Рисунок 7 – Результаты моделирования множественного зарождения трещин

На основе анализа баланса энергии в вершине усталостной трещины получены соотношения, аналогичные соотношениям теории разрушения слоя³:

$$\frac{da}{dN} = \frac{1}{h(J_c - J)} \frac{dE_s}{dN} \quad (18)$$

² Oliferuk W., Maj M. Stress-strain curve and stored energy during uniaxial deformation of polycrystals // Europ. J. Mech. A. Solids. – 2009. – V.28. – P. 266-272

³ Chydnovsky A., Moet A. Thermodynamics of translational crack layer propagation// J.Mater.Sci. – 1985. – V. 20. – P. 630-635

В уравнении (18): $\frac{da}{dN}$ – скорость роста усталостной трещины, $\frac{dE_s}{dN}$ – значение накопленной энергии за один цикл деформирования, h – толщина образца, J – энергетический J-интеграл, J_c – критическое значение J-интеграла.

Проведен расчет скорости роста усталостной трещины в сплаве ОТ-4 с помощью уравнения (18) и закона Пэриса, являющегося классическим для анализа усталостного распространения трещины. Показано, что уравнение, учитывающее баланс энергии, лучше описывает экспериментальные данные (рис. 8). Кроме того, уравнение (18) является более подходящим для объяснения роста усталостной трещины.

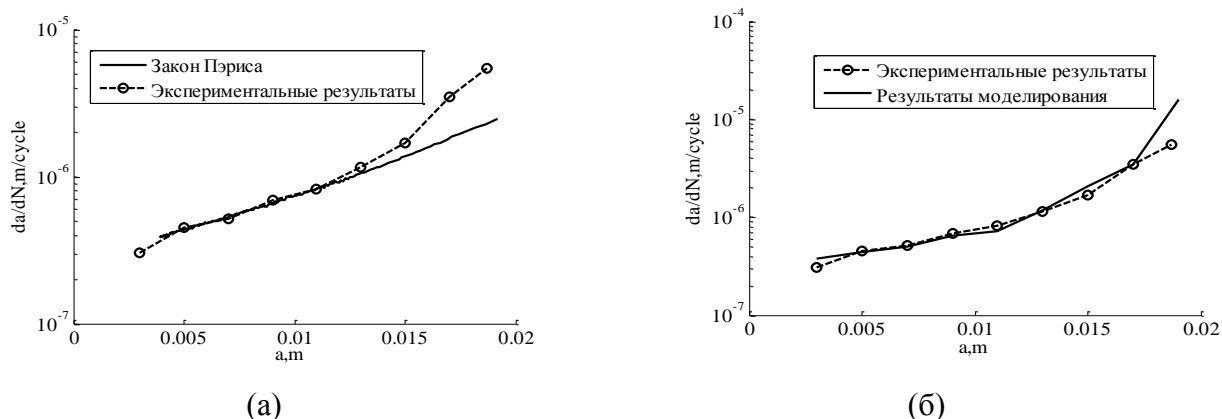


Рисунок 8 – Скорость роста усталостной трещины в зависимости от длины трещины в полулогарифмических координатах для титанового сплава ОТ4-0, рассчитанная по: (а) закону Пэриса; (б) уравнению (18)

Определяющие соотношения (1)-(2) ((11)-(12)), (3)-(9) позволяют провести моделирование процесса распространения трещины при сложном напряженно-деформированном состоянии. Результаты моделирования пути распространения трещины при циклическом кручении цилиндрических образцов из стали 08X18N10 находятся в согласовании с результатами, опубликованными в работе F. Rabold и M. Kuna⁴.

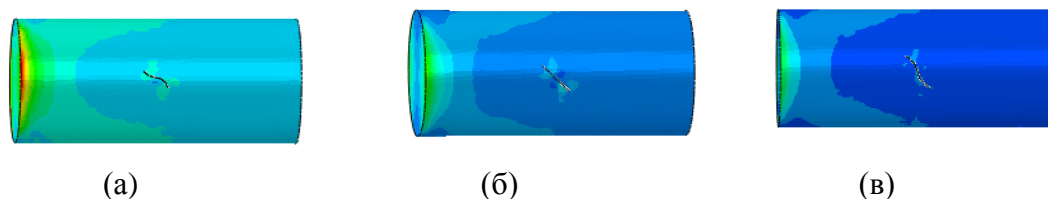


Рисунок 9 – Распределение напряжения по Мизесу в цилиндрическом образце с трещиной, расположенной в начальный момент времени под углом: (а) 15° ; (б) 45° ; (в) 75°

⁴ Rabold F., Kuna M. Automated finite element simulation of fatigue crack growth in three-dimensional structures with the software system ProCrack// Procedia Materials Science. – 2014. – V. 3. – P. 1099-1104

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе, на основе развития статистико-термодинамической модели коллективного поведения ансамблей дефектов, построены определяющие соотношения, позволяющие описывать баланс энергии в процессе деформирования и разрушения металлов. Расчет баланса энергии открывает возможности для разработки новых критериев разрушения и анализа уже существующих, моделирования температурных эффектов в процессе деформирования и разрушения.

К основным результатам работы можно отнести следующее.

1. Построена математическая модель, описывающая механическое и термодинамическое поведение металлов и сплавов, а также эволюцию накопленной и диссипированной энергий при квазистатическом и циклическом деформировании.
2. Построена зависимость, описывающая изменение величины структурной деформации в процессе квазистатического нагружения металлов.
3. Предложен подход, позволяющий определить изменение энтропии при неупругом деформировании металлов, на основе анализа экспериментальных данных эволюции температуры поверхности образца в процессе деформирования.
4. Предложены и реализованы алгоритмы на языке программирования FORTRAN, позволяющие моделировать процессы неупругого деформирования и разрушения металлов с учетом баланса энергии в их структуре, с использованием конечно-элементного пакета Simulia Abaqus.
5. Решена задача определения напряженно-деформированного состояния и баланса энергии в структуре материала при квазистатическом нагружении образцов из стали 08X18H10 и стали 03X18H11, титанового сплава ОТ4-0.
6. Проведено численное моделирование процессов зарождения и распространения трещины в образце из стали 08X18H10 при квазистатическом деформировании и в условиях сложного напряженно-деформированного состояния с помощью критерия, основанного на величине накопленной энергии.
7. Проведено численное моделирование процесса распространения усталостной трещины в титановом сплаве ОТ4-0 на основе расчета баланса энергии в зоне разрушения, показано преимущество предложенного подхода над традиционными методами, использующими уравнение Пэриса.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Kostina A., Plekhov O. The entropy of an armco iron under irreversible deformation // *Entropy*. – 2015. – V. 17. – P. 264-276 (WoS)
2. Костина А.А., Плехов О.А. Моделирование баланса энергии в процессе деформирования и разрушения стали 8х18н10 при квазистатическом растяжении // *Математическое моделирование*. - 2015. - Т. 27. - №8. - С. 85-95 (БАК)
3. Kostina A., Fedorova A., Plekhov O. Energy dissipation and storage in iron under plastic deformation (experimental study and numerical simulation) // *Fracture and Structural integrity*. – 2014. – N. 27. – P. 28-37. (Scopus)
4. Костина А.А., Баяндин Ю.В., Плехов О.А. Моделирование процесса накопления и диссипации энергии при пластическом деформировании металлов// *Физическая мезомеханика*. – 2014. – Т.17. – №1. – С. 43-49. (БАК)
5. Kostina A., Bayandin Y., Naimark O., Plekhov O. Numerical simulation of damage to fracture transition in metals based on the statistical model of mesodefekt evolution // *Key Engineering Materials*. – 2014. – V. 592-593. – P. 205-208.(WoS)
6. Kostina A., Plekhov O. Simulation of the dissipated and stored energy under deformation and failure of metallic materials// *AIP Conference Proceedings*. – 2015. – V. 1683. – P. 020098. (WoS)
7. Kostina A., Plekhov O. Simulation of the energy balance in metals under irreversible deformation// *Solid state phenomena*. - 2016. - V. 243. - P. 43-50.(Scopus)
8. Баяндин Ю.В., Костина А.А., Наймарк О.Б., Пантелеев И.А. Моделирование деформационного поведения ванадия при квазистатическом нагружении // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2012. – Т.5. - №1. - С. 33 – 39(БАК)
9. Iziyomova A., Vshivkov A., Prokhorov A., Kostina A., Plekhov O. The study of energy balance in metals under deformation and failure process // *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. – 2016. – V.13. – P. 242-256(WoS)
10. Kostina A., Plekhov O. Numerical simulation of the dissipated and stored energy in metals under cyclic loading // *Proceedings of the 11th World Congress on Computational Mechanics*, July 20-25, 2014, Barcelona, Spain. – P. 2981-2988.(WoS)
11. Kostina A., Bayandin Yu., Naimark O., Plekhov O. Modeling of Strain Localization and Failure in Vanadium under Quasistatic Loading // *Proceedings of the 13th International Conference on Fracture (ICF13)*, June 16-21, 2013 June 16-21, 2013, Beijing, China. – P.1007-1016 (Scopus)