

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу КОСТИНОЙ АНАСТАСИИ АНДРЕЕВНЫ «МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛАНСА ЭНЕРГИИ ПРИ НЕУПРУГОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ И РАЗРУШЕНИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела в диссертационном совете Д 002.075.01 при Институте проблем машиноведения РАН (199178, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, Большой пр., д. 61).

Диссертационная работа А.А. Костиной посвящена **актуальной** задаче теоретического исследования накопления энергии в дефектной подсистеме материала в ходе его пластической деформации. Динамика накопления энергии дефектной подсистемой, с одной стороны, влияет на ее эволюцию, то есть изменение микроструктуры и свойств материала при деформации, с другой стороны, определяет способность материала эффективно поглощать и рассеивать энергию, сохраняя свою целостность под действием внешних сил. Насыщение запасаемой энергии может рассматриваться как предвестник макроскопического разрушения материала, то есть появления и развития нового вида дефектов, поскольку означает неспособность существующей дефектной подсистемы справляться с внешним воздействием. Поэтому надежные данные по динамики накопления энергии актуальны как для прогнозирования свойств существующих, так и для разработки новых материалов. Имеющиеся экспериментальные данные по доле запасаемой энергии от полной работы пластической деформации нуждаются в теоретическом обосновании и согласовании. Чисто феноменологические модели пластичности, нашедшие широкое распространение в вычислительной практике, не могут решить данную задачу, поскольку не учитывают в явном виде наличие структурных дефектов. В кандидатской диссертации А.А. Костиной для этой цели развита и применена термодинамически согласованная модель пластической деформации, учитывающая состояние дефектной подсистемы как дополнительную внутреннюю тензорную переменную. Данная модель представляет собой обобщение подхода, развиваемого в лаборатории Физических основ прочности ИМСС УрО РАН. Отличительной особенностью описанной в рамках диссертации модели является подробный анализ баланса энергии. Это позволило, помимо прочего, провести в рамках диссертации моделирование разрушения металлов при помощи критерия достижения накопленной энергией критической величины.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 128 наименований, изложена на 153 страницах, содержит 52 рисунка.

Во введении приводится обоснование актуальности выбранной темы исследования, степень её разработанности, сформулированы цели и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту. Показаны теоретическая и практическая значимость, достоверность, научная новизна работы. Представлены методология и методы научного исследования. Обсуждается личный вклад автора, который заключается в участии в разработке модели, разработке, написании и отладке всех представленных в работе численных алгоритмов, проведении численных экспериментов и сопоставлении их результатов с результатами других авторов и результатами экспериментов.

Первая глава носит обзорный характер. В ней приведены основные экспериментальные и теоретические результаты исследования баланса энергии в металлах и сплавах в процессе пластического деформирования, проанализированы энергетические подходы к описанию разрушения металлов.

Во второй главе подробно описана развитая в рамках диссертации модель пластической деформации металлов с явным учетом баланса энергии. Описаны общие принципы построения термодинамически согласованной модели, принятые приближения, выведены конечные уравнения модели. Предложенные соотношения основаны на обобщении разработанной ранее в ИМСС УрО РАН статистико-термодинамической модели среды с дефектами. Дефектная подсистема характеризуется дополнительной внутренней переменной – тензором плотности дефектов, который усредненно описывает ансамбль дефектов, обеспечивающих пластическую деформацию, без конкретизации их типа (дислокации, двойники). Тензор плотности дефектов используется при записи термодинамических потенциалов и позволяет разделить пластическую деформацию и затрачиваемую энергию на части, связанные с образованием и движением дефектов. Приведены примеры использования развивающегося подхода для расчета производства энтропии и эволюции плотности дефектов при деформации армко-железа.

В третьей главе описывается численная реализация предложенных определяющих соотношений пластической деформации и критерия разрушения. И то и другое реализованы в рамках пакета конечно-элементного моделирования *Simulia Abaqus* в виде пользовательских функций UMAT и UDMGINI, написанных на языке FORTRAN. Описывается используемый в работе расширенный метод конечных элементов (XFEM). Большое внимание уделено методам расчета J-интеграла.

В четвертой главе изложены результаты численного моделирования процессов диссиpации и накопления энергии при деформировании и разрушении металлов. В качестве объектов исследования рассматриваются образцы из стали 03Х18Н11, стали 08Х18Н10 и титанового сплава ОТ4-0. На основе развитой модели проведен расчет кривых напряжение-деформация и их сравнение с экспериментальными результатами. Проведено моделирование

накопления энергии в материале, также выполнено их сравнение с результатами экспериментов. Во всех случаях продемонстрировано хорошее согласие с экспериментальными данными, в частности, показано превышение доли накопленной энергии над диссипированной в титановом сплаве ОТ4-0. В части разрушения металлов промоделированы: зарождение и рост трещины в образце специальной формы из стали 08Х18Н10 при растяжении; рост усталостной трещины в титановом сплаве ОТ4-0 при циклическом нагружении; распространение трещины в неоднородном цилиндрическом образце из стали 08Х18Н10 при кручении; разрушение опоры подшипника из стали 08Х18Н10 при сложном нагружении.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Текст диссертации в целом хорошо структурирован и написан хорошим языком. По содержанию проделанной в диссертации работы можно отметить следующие моменты, отражающие ее **новизну и практическую значимость**:

1. Предложена и протестирована термодинамически согласованная модель пластической деформации материала с учетом эволюции плотности структурных дефектов и явным описанием баланса энергии между диссипацией и накоплением в дефектной подсистеме. Модель численно реализована в рамках коммерческого пакета конечно-элементного моделирования Simulia Abaqus, что открывает перспективы практического использования результатов работы в инженерных расчетах.

2. Результаты моделирования показывают постоянное изменение в ходе деформации той доли работы пластического деформирования, которая накапливается в виде энергии дефектной подсистемы. Показано, что в некоторых ситуациях эта доля может составлять более 50%. Показана возможность насыщения накопленной дефектами энергии. Полученные результаты соответствуют экспериментальным данным, что, с одной стороны, показывает работоспособность предложенных подходов, с другой стороны, позволяет теоретически обосновать результаты экспериментов.

3. Продемонстрирована эффективность использования предложенного подхода совместно с энергетическим критерием разрушения для моделирования образования и развития трещин в металлах при различных видах нагружения.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обуславливается термодинамической согласованностью развивающейся модели материалов, использованием базовых принципов механики сплошных сред, апробированного пакета конечно-элементного моделирования, а также соответствием результатов численного моделирования экспериментальным данным.

Результаты работы достаточно полно **опубликованы** в печати и **дожены** на научных конференциях. Приведенный в автореферате список публикаций автора содержит 11 работ в журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ или приравненных к ним. **Автореферат полностью отражает содержание диссертации.**

При ознакомлении с содержанием диссертационной работы возникли следующие **вопросы и замечания:**

1. Несмотря на термодинамическую согласованность, предлагаемый подход не полностью лишен недостатков, присущих феноменологическим моделям, а именно, произвола в выборе определяющих соотношений и материальных функций (в рамках наложенных термодинамикой ограничений). В диссертации не приведено достаточного обоснования, почему используются именно предложенные зависимости, например (2.52), (2.53), (2.55). Не объясняется, почему (4.14) подходит для двух марок сталей, а для титанового сплава – нет (пункт 4.1), хотя условия нагружения подобны.

2. Модель содержит достаточно большое количество параметров, процедура их выбора для конкретных материалов не описана. Не обсуждается чувствительность результатов к значению параметров. Кроме того, в тексте не указаны размерности используемых материальных параметров (стр. 111-113).

3. Согласно определению параметра структурного скейлинга (стр. 64), используемое постоянное значение $\delta = 1$ (стр. 111) соответствует тому, что характерный размер дефектов равен радиусу их взаимодействия, то есть, достаточно большой, в том числе в начальный момент времени. С другой стороны, начальная плотность дефектов равна нулю (стр. 108, условие (4.13)). Не понятно, как это согласуется, и почему используется постоянное значение δ при наличии эволюции системы дефектов?

4. Означает ли предполагаемая соосность тензора напряжений и тензора плотности дефектов (структурных изменений) (стр. 54, 64), что модель применима только при постоянной конфигурации напряжений? В тексте это не обсуждается. Означает ли соосность этих тензоров и наличие в (2.50) только модуля сдвига, что рассматриваемые в этом разделе напряжения чисто сдвиговые? В тексте не обосновывается, почему при моделировании разрушения за нормаль к трещине выбирается главное направления тензора плотности дефектов.

5. В описании к рис. 46 говориться, что отношение накопленной энергии к работе пластической деформации достигает 0.49, но на рис. 4.7 отношение соответствующих мощностей не превышает 0.4. Как это соотносится друг с другом?

6. Наблюдаются некоторые проблемы с размерностями величин. Так правая часть (2.79) на стр. 72 не соответствует по размерности левой части. В (2.112) на стр. 81 коэффициент φ должен быть размерным. Стр. 55, в (2.1) используется удельная внутренняя энергия, но при этом

мощность сил, дивергенция потоков тепла – на единицу объема. Стр. 66, (2.56), (2.57) – должно быть « \hat{p} » вместо « \tilde{p} ».

7. Имеется ряд опечаток и погрешностей в обозначениях. Стр. 29, потеряна $\dot{\varepsilon}^p$ при переходе между двумя нижними формулами. На стр. 66 г – внешний источник тепла, на стр. 67 – внутренняя переменная. Стр. 65, не пропечаталась формула для $\tilde{\sigma}_d$. Стр. 77, в (2.105) первое слагаемое справа должно отсутствовать, иначе полностью совпадает с предыдущим выражением.

Сделанные замечания **не снижают** научную и практическую ценность работы. Диссертация и публикации автора свидетельствуют о том, что работа выполнена на высоком научном уровне. Представленные в диссертации результаты могут быть квалифицированы как решение научной задачи теоретического анализа накопления энергии в дефектной подсистеме металлов и сплавов, имеющей существенное значение для развития механики пластического деформирования материалов, что соответствует специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Диссертационная работа Костиной Анастасии Андреевны «Моделирование баланса энергии при неупругом деформировании и разрушении металлов и сплавов» является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне, удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Костина А.А., заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Официальный оппонент
заведующий кафедрой общей и прикладной физики
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Челябинский государственный университет»,
(454001, Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129, ауд. 218, 8(351)7997161, mayer@csu.ru)
доктор физико-математических наук (специальность 01.04.02 – теоретическая физика)

Майер Александр Евгеньевич

27.02.2017



Майер А.Е.
Анна Николаевна

запечатлел моей рукой