

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию **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 твердого тела

Актуальность диссертации. Разработка моделей для описания процесса деформирования кристаллических тел, приводящего к накоплению структурных изменений, зарождению и подрастанию трещин, и, в конечном итоге, к разрушению всегда привлекало внимание большого числа исследователей. Это обусловлено, в первую очередь, необходимостью прогнозирования срока службы элементов конструкций и устройств, в условиях постоянного возрастания требований в плане роста уровня и времени действия силовых, температурных и других воздействий. Изменения структуры материалов сложны и многообразны, поэтому ключевым моментом для успешного описания ее влияния на механические свойства материалов является выбор внутренних переменных, характеризующих это влияние. Одной из первых предложенных и используемых до настоящего времени в этом плане величин является работа напряжений на пластических деформациях, которая в некоторых случаях успешно служит в качестве параметра упрочнения. В то же время очевидно, что эта величина не является параметром состояния, что ограничивает возможности моделей, основанных на ее использовании в качестве меры структурных изменений. Более подходящей кандидатурой на роль характеристики структуры является плотность дислокаций, являющихся источниками внутренних напряжений, упругая энергия которых есть важная составляющая накопленной структурной энергии. В последнее время этот подход в механике материалов получил успешное развитие в Институте Механики Сплошных Сред УрО РАН в работах О.Б.Наймарка, О.А.Плехова и соавторов. Развиваемые в этой научной школе модели успешно встраиваются в коммерческие конечноэлементные программные пакеты, что дает возможности для предсказания деформации и разрушения элементов конструкций. Из сказанного следует вывод об актуальности диссертационной работы А.А. Костиной.

Фундаментально-научное значение работы состоит в развитии представлений о взаимосвязи структуры материалов и их свойств, термодинамических аспектов построения механических моделей с внутренними переменными, установления взаимосвязи с этих моделей с другими подходами в механике разрушения.

Практическое значение работы очевидно и обусловлено тем, что в ней разработаны новые методы моделирования развития неупругой деформации и разрушения элементов конструкций, что позволяет в ряде случаев уменьшить количество натурных экспериментов, заменив их модельными расчетами.

Научная новизна работы состоит в том, что на базе ранее разработанной концепции построены новые модели для расчета накопления структурной и диссирированной энергии, выполнены численные расчеты деформации образцов, изготовленных из ряда конструкционных материалов, проведены расчеты зарождения и распространения трещин, выполнено встраивание уравнений предложенной модели в программный конечноэлементный пакет ABAQUS, решены тестовые краевые задачи.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, обеспечена последовательным применением принципов термодинамики, хорошим владением математическим аппаратом, аккуратном проведением вычислений, качественным и количественным соответствием расчетных зависимостей напряжения и накопленной структурной энергии от деформации.

Апробация. Результаты диссертации доложены на ряде российских и международных научных конференций. Имеется достаточное число публикаций в журналах, рекомендованных ВАК.

Диссертация содержит **содержательный обзор** работ, посвященных развитию концепции эволюции механических свойств материалов в связи с переходом закачанной в материал механической энергии посредством работы внешних сил на пластической деформации в структурную энергию и тепловую энергию. Обзор, таким образом, свидетельствует о хорошем знакомстве автора с предметом работы. Рассматриваются различные классы моделей, отмечены их достоинства и недостатки. Диссертация содержит необходимые рисунки и графики.

Можно отметить следующие наиболее важные результаты, полученные в диссертации. Построена модель для расчета вязкоупругой и пластической деформаций на основе использования в качестве внутренней переменной структурной деформации, совпадающей с плотностью петель дислокаций, при последовательном учете законов термодинамики. Предложен критерий разрушения материала, связанный с эффектом достижения структурной энергией уровня насыщения. Уравнения модели встроены в конечноэлементный пакет ABAQUS. Выполнено моделирование диаграмм деформирования образцов из конструкционных материалов - стали 03Х18Н11, стали 8Х18Н10, титана ОТ4-0, показано хорошее соответствие расчетных зависимостей с экспериментальными. Установлена связь предложенного критерия разрушения с

критериями, основанными на использовании концепции трещиностойкости и инвариантного J -интеграла. Следует отметить, что в диссертации выполнено моделирование роста трещины не только в условиях плоской деформации или плоского напряженного состояния, но и в трехмерной постановке при сложном напряженном состоянии.

Автореферат дает достаточно хорошее представление о диссертации и полностью соответствует ее содержанию.

По тексту диссертации можно сделать следующие **замечания**.

1. Глава 2 фактически представляет собой дополнительный литературный обзор, в который включены работы, положения которых автор предполагает использовать в диссертации (введение внутренних переменных для описания структурных изменений, принципы термодинамики, построение свободной энергии, диссилиативных потенциалов и т.д.). Этот обзор перегружен обозначениями и формулами, претендующими на максимальную общность, например, в формуле (2.5) “внутренние переменные описываются с помощью набора симметричных тензорных переменных $V_k, k=1, \dots, n$ ”, хотя в дальнейшем автор использует только одну такую переменную, что, кстати, указано во введении к главе 2. При этом неясно, где начинается личный вклад автора, поскольку ссылки на работы с ее участием в тексте диссертации отсутствуют. Без ущерба для диссертации главу 2 после введения можно было бы сразу продолжить с раздела 2.4.
2. Одним из ключевых моментов является введение функций Γ_σ и Γ_p . Как можно заключить из формулы (2.48) $(\Gamma_\sigma)^{-1}$ является коэффициентом вязкости, нелинейно зависящим от напряжения. Однако, в тексте диссертации никак не обосновывается выбор вида этих функций и не обсуждается их физический смысл.
3. Фактически в работе обсуждаются две разные модели. Одна из них содержит соотношения типа (2.79) и (4.4), которые выражают зависимость скорости деформации от скорости изменения напряжения, характерные для теории пластичности. Другая же модель включает формулы типа (2.48) и (4.14), устанавливающие связь между скоростью деформации и напряжением, типичную для вязкой жидкости. Однако, в диссертации при построении модели это различие никак не обсуждается, и только при выполнении конкретного расчета на с.112 отмечено, что модель, основанная на (4.14) описывает максвелловскую жидкость. Вообще, в диссертации не обсуждается вопрос о том, как в модели рассчитывается предел текучести материала.

4. В диссертации никак не описана процедура подбора значений материальных постоянных, а при описании конкретных расчетов их значения приведены без указания единиц измерения.
5. На с 122, 123 утверждается, что "зарождение трещины в материале происходит при скорости накопления энергии стремящейся к нулю, что с физической точки зрения означает превращение всей пластической работы в тепло, потерю материалом возможности формирования новых дефектных структур и диссирирование энергии только за счёт движения и аннигиляции дефектов". Однако, состояние структурной сверхпластичности характеризуется равновесием между процессами рождения дислокаций с одной стороны, и их аннигиляции и выхода на поверхность, с другой. Вся работа пластической деформации при этом преобразуется в тепло, но разрушения не наступает до очень больших степеней деформации.
6. На с.64 при выводе формулы (2.50) используется предположение о соосности тензоров σ и r . Однако, поскольку оси тензора напряжений при нагружении общего типа могут поворачиваться, данное предположение означает, что формула (2.50) применима только для простого нагружения.
7. Не разъясняется смысл параметра структурного скейлинга δ , функции $f_1(p)$ (с.72),
8. Имеется большое количество опечаток, неточностей и неудачных выражений. Среди них можно отметить следующие.
 - (а) "Величина β представляет собой отношение скорости совершенной работы к мощности диссирированной энергии" (с.19). На самом деле – обратное отношение.
 - (б) По всей видимости, имеется опечатка в формуле (2.105).
 - (в) Выражение "вязкие напряжения" (с.37) явно неудачно.
 - (г) "Необходимо отметить, что данные соотношения получены в предположении того, что пластические и структурные деформации являются изохорными" (с.88). Однако, изохорным называется процесс, при котором деформация не изменяется.
 - (д) "Индекс i ... указывает на число элементов, используемое при определении напряжения по Мизесу" (с.108). Однако, напряжение по Мизесу рассчитывается в точке, то есть определяется для каждого отдельного узла.
 - (е) Неясно, что обозначено буквой f в формуле (4.18) – переменная или функция.
 - (ж) Неясно происхождение коэффициента 0.1 в формуле для W на с.44. К тому же предел текучести σ_y , когда он существует, совпадает с условным пределом текучести $\sigma_{0.2}$. Очевидно, под σ_y автор имел в виду предел пропорциональности.
 - (з) На рис. 1.4. скорость накопления энергии измеряется в Дж/г.

(и) Не проследить логику в утверждении: " Чем больше количество переменных кинематического упрочнения, тем ниже значение переменной, характеризующей изотропное упрочнение, и тем ниже отношение накопленной энергии к работе пластической деформации". Как может количество переменных влиять на величины энергий?

Сделанные замечания относятся, в основном, к стилю изложения и не влияют на общую положительную оценку диссертации, которая является законченным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. Результаты являются новыми и имеют научное и практическое значение. Проблемы, решению которых посвящена данная работа, актуальны, полученные результаты достоверны. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Полученные результаты описаны в публикациях автора. Таким образом, работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Костина Анастасия Андреевна обладает необходимой квалификацией и заслуживает присуждения ей искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04. – механика деформируемого твердого тела.

Профессор кафедры теории упругости
Санкт-Петербургского Государственного Университета
д.ф.-м.н.

А.Е.Волков

199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб. д.7-9,
тел.: (812)428-70-79, электронный адрес: a.volkov@spbu.ru

личную подпись заверяю

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА КАДРОВ №3

Н.И. МАШТЕПА



Документ подготовлен
в порядке исполнения
трудовых обязанностей