

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., профессора А.А. Маркина на диссертационную работу Швейкина Алексея Игоревича «**Многоуровневые модели для описания пластического и сверхпластического деформирования поликристаллических металлов и сплавов**», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Большинство технологических процессов термомеханической обработки металлических материалов и изделий из них основано на достижении больших пластических деформаций. Однако к настоящему времени в механике деформируемого твердого тела (МДТТ) отсутствует однозначно признанный подход к формулировке определяющих соотношений при больших деформациях. Практическое отсутствие моделей материалов, способных предсказывать их поведение с учетом изменения структуры материала определяет **актуальность** предлагаемого подхода к формулировке геометрически нелинейных определяющих соотношений в рамках многоуровневых моделей материалов. Важным преимуществом моделей рассматриваемого класса является способность описания изменения структуры и свойств материала на уровне распределения зерен и кристаллитов.

Теоретическая значимость исследования определяется построением многоуровневых моделей поликристаллических металлов и сплавов, основанных на использовании теории дислокаций и межграничного скольжения для определения необратимых составляющих деформации.

Научная новизна работы включает:

1. Установление связей между физическими параметрами кристаллитов и их границ на мезо уровне и характеристиками напряженно - деформированного состояния материала на макро уровне.

2. Постановку и решение задач описания двухуровневого упругопластического и упруговязкопластического деформирования при однородном кинематическом нагружении.

3. Постановку и решение задач сверхпластического (СП) трёхуровневого деформирования при однородном кинематическом нагружении.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования предложенных многоуровневых конститутивных моделей и реализующего их комплекса программ для исследования поведения материалов при термомеханической обработке (в частности – с использованием деформирования в режиме структурной СП), необходимого для совершенствования существующих и создания новых технологий обработки материалов методами интенсивного деформирования.

Краткий обзор работы. Диссертация состоит из введения, списка сокращений и основных обозначений, шести глав, заключения, списка использованной литературы. Работа изложена на 302 страницах, содержит 66 рисунков и 6 таблиц, список литературы содержит 467 ссылок на работы отечественных и зарубежных авторов, большинство из которых опубликовано в последние десятилетия, однако присутствуют и ссылки на значимые публикации прошлого века.

Введение содержит обоснование актуальности выбранной темы исследования и характеристику степени ее разработанности. Сформулированы цель и задачи работы. Освещены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, подходы и методы исследования, положения, выносимые на защиту. Приведена информация о степени достоверности и о весьма существенной апробации результатов. Представлено краткое описание содержания глав диссертационной работы.

В первой главе анализируется современное состояние в области моделирования неупругого деформирования моно- и поликристаллических металлов и сплавов. Приводится информация об основных подходах к формулировке определяющих соотношений: макрофеноменологическом, термодинамическом, структурно-имитационном, физическом; обосновывается предпочтительность использования для решения поставленных в работе задач физического подхода с явным учетом механизмов деформирования. Изложены основные особенности указанного подхода, основанного на явном введении в структуру определяющих соотношений внутренних переменных, отражающих текущее состояние мезо- и микроструктуры, и формулировке на базе сведений

из физики твердого тела и физического материаловедения кинетических уравнений для этих параметров. Приводится краткий обзор известных способов построения многоуровневых моделей материалов в рамках указанного подхода. Обозначены основные нерешенные вопросы, возникающие при построении многоуровневых моделей поликристаллических металлов и сплавов, на поиск решения которых было нацелено исследование.

Во **второй** главе описывается структура двухуровневой модели неупругого деформирования поликристаллов, приводятся соотношения для определения скорости неупругого деформирования кристаллита за счет внутризеренного дислокационного скольжения (ВДС), в частности, предложенная модификация упругопластической модели Лина для геометрически нелинейного случая.

В **третьей** главе рассмотрены некоторые нерешенные проблемы построения геометрически нелинейных моделей МДТТ, на основе анализа которых сделаны выводы о предпочтительности формулировки определяющих соотношений в актуальной конфигурации в скоростях с использованием коротационных производных, а также – об отсутствии физических обоснований для применения популярных коротационных производных для анизотропных материалов. Отмечается, что существующие подходы к формулировке скоростных соотношений в актуальной конфигурации недостаточное внимание уделяют изменению структуры поликристаллических металлов и сплавов.

Далее приводится предлагаемый автором подход к построению кинематических и скоростных определяющих соотношений для поликристаллических металлов и сплавов при больших градиентах перемещений, основанный на использовании многоуровневого моделирования. Предлагается новое представление движения среды на мезоуровне последовательностью пластических деформаций (с неизменным положением кристаллической решетки и связанной с ней жесткой подвижной системы координат (ПСК)), поворота ПСК вместе с материалом и упругого искажения решетки относительно ПСК – вводится соответствующее мультипликативное разложение транспонированного градиента места. С использованием этого представления кинематики сформулированы определяющие соотношения в решеточной разгруженной конфигурации, для которых выполняются

требования отсутствия гистерезиса напряжений и диссипации энергии при произвольном упругом циклическом деформировании. Предлагается обоснование перехода для случая малых упругих искажений, характерных для металлов и сплавов, к близким определяющим соотношениям в актуальной конфигурации с использованием аддитивного разложения градиента скорости перемещений.

В **четвертой** главе предложенные формулировки соотношений мезоуровня сопоставляются с известными. На основании аналитических выкладок делается заключение, что предложенные формулировки моделей мезоуровня дают близкие результаты к получаемым в известных моделях (не возникает существенных различий с опубликованными другими авторами результатами, подтвержденными экспериментальными данными), однако предложенный подход позволяет теоретически обоснованно перейти к формулировке в скоростной форме в актуальной конфигурации, предпочтительной как для численного решения краевых задач с изменяющимися контактными условиями, так и для построения расширенных многоуровневых моделей с учетом дополнительных механизмов деформирования (это используется в главе 6). Приведена постановка краевой задачи для описания технологических процессов с использованием такой модели материала.

Пятая глава посвящена рассмотрению алгоритма численной реализации двухуровневой модели, описанию и анализу численных результатов моделирования неупругого деформирования отдельных кристаллитов и поликристаллов при различных однородных нагружениях. Проведено сопоставление численных результатов, полученных при применении разных формулировок мезоуровня, рассмотренных в главе 4. Представлена методика оценки чувствительности моделей к возмущениям входных данных и результаты ее применения для исследования двухуровневых моделей, свидетельствующие об устойчивости к возмущениям рассмотренных параметров.

В **шестой главе** приведен обзор экспериментальных исследований СП деформирования, а также существующих моделей для его описания. В результате синтеза информации об опытах предложен «сценарий», реализующийся во время одноосного испытания с переходом в режим

структурной СП. Предложена трехуровневая модель, сформулированная на основе двухуровневой модели в скоростной форме в актуальной конфигурации (глава 3) с дополнительным описанием ряда механизмов и их взаимодействий, в частности, учтены: зернограничное проскальзывание, динамическая рекристаллизация, механическое и диффузионное выглаживание границ зерен, повышение энергии границ в результате притока решеточных дислокаций. Представлены результаты идентификации и верификации модели для одноосных испытаний сплава 1420 с кривыми растяжения, демонстрирующими стадийный характер; приведена информация об изменении полюсных фигур и характеристик зернограничного скольжения. Тем самым проиллюстрированы возможности расширенной трехуровневой модели для адекватного воспроизведения процесса деформирования в испытаниях на одноосное растяжение с выходом в режим сверхпластичности.

В **заключении** приведены основные полученные результаты и выводы по итогам выполненного исследования, подтверждающие достижение поставленной **цели** исследования – построение многоуровневых геометрически и физически нелинейных моделей для описания деформирования поликристаллических металлов и сплавов. С помощью созданных моделей исследованы закономерности процессов упругопластического, упруговязкопластического и сверхпластического деформирования.

Содержание работы свидетельствует о **высокой степени обоснованности** научных положений, предложенных в работе, и их **новизне**.

Достоверность результатов исследования обусловлена корректным использованием известных представлений и законов нелинейной механики и физики деформируемого твердого тела, применением апробированных эффективных численных методов, аналитическим подтверждением непротиворечивости предложенных двухуровневых моделей представленным в литературе, удовлетворительной сходимостью численных процедур, соответствием полученных результатов расчетов и экспериментальных данных.

По диссертационной работе имеются следующие **замечания**:

1. Сформулированная на стр. 9 цель работы состоит из одного сложносочиненного предложения размером в треть страницы. Следовало бы изложить цель в более краткой и ясной форме. Стремление "объять

необъятное" прослеживается и в формулировках результатов и выводов по работе, приведенных на стр. 253-256.

2. При исследовании структурных изменений в материале недостаточное внимание уделено определению изменения вида анизотропии на макро уровне, хотя качественное описание изменения текстуры приводится.

3. При описании алгоритма реализации модели мезо уровня на стр. 150-151 не рассмотрен процесс разгрузки и определения остаточных микронапряжений. Не ясно, определялись ли остаточные микронапряжения и какие результаты получены?

4. Из физического смысла соотношений, определяющих тензорные характеристики на мезо и макро уровнях (стр. 140-141), следует, что логично использовать тензоры инвариантные относительно вращения кристаллитов ("повернутые" по терминологии А.И.Лурье), поэтому вместо тензора I можно ввести тензор

$$I_o = o \cdot I \cdot o^T,$$

где o – тензор текущей ориентации кристаллографической системы координат зерна.

Тогда тензор скорости деформации z будет связан с тензором деформации скорости выражением

$$z = o \cdot D \cdot o^T.$$

Упругая составляющая градиента скорости представляется в виде

$$I_o^e = I_o - z^{in}.$$

Раскладывая в последнем выражении тензоры на симметричную и антисимметричную составляющие, получим

$$z^e + \varpi_o^e = z + \varpi_o - z^{in},$$

где $z^e = \frac{1}{2}(I_o^e + I_o^{eT})$, $\varpi_o^e = \frac{1}{2}(I_o^e - I_o^{eT})$.

В этом случае соблюдается условие аддитивности тензоров скоростей деформаций

$$z = z^e + z^{in}$$

и условие связи тензоров относительных скоростей вращений

$$\varpi_o^e = \varpi_o.$$

В левой части закона упругости будет стоять "повернутый" (инвариантный относительно вращения зерна) тензор скорости напряжений, связанный с коротационной скоростью индифферентного тензора напряжений формулой

$$\dot{\mathbf{k}}_o = \mathbf{o} \cdot \mathbf{k}^{cr} \cdot \mathbf{o}^T.$$

Приведенные рассуждения следует рассматривать не как замечание, а как возможность альтернативного подхода к записи соотношений на стр.140–141. При этом исключается сложение индифферентных тензоров деформации скорости с инвариантными тензорами скорости деформации.

5. В главе 3 демонстрируется отсутствие диссипации энергии на замкнутых упругих циклах, однако в диссертации не найдены данные о модельных оценках диссипации энергии при неупругом деформировании. Не ясно, выполняется ли необходимое для моделей сплошных сред неравенство диссипации.

6. При обзоре работ, учитывающих изменение структуры материала в процессе конечного деформирования, было бы полезно сравнить предлагаемый подход с предложенным в статье:

Маркин А.А. Об изменении упругих и пластических свойств при конечном деформировании // Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1990. – № 2. – С.120-126.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и квалификации ее автора. Диссертация хорошо структурирована, написана на высоком профессиональном уровне. Результаты диссертационной работы опубликованы в значительном числе статей в известных журналах, апробированы на большом количестве конференций и семинаров. Содержание автореферата соответствует диссертации. Тема диссертации соответствует цели паспорта специальности МДТТ: **выявление новых связей между структурой материалов, характером внешних воздействий и процессами деформирования и разрушения**. На основании изложенного можно утверждать, что диссертация Швейкина Алексея Игоревича является завершённой научно-квалификационной работой, содержит новые научные положения, совокупность которых можно характеризовать как научное достижение в **исследовании процессов конечного деформирования**

поликристаллических материалов с учетом изменения их структуры на основе построения оригинальных многоуровневых моделей.

Считаю, что диссертация А.И. Швейкина удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней (утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г.), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор – Швейкин Алексей Игоревич – заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры «Вычислительная механика и математика»
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Тульский государственный университет»
300012, г. Тула, пр. Ленина, 92
тел.+7(4872) 25-46-22, e-mail: markin@tsu.tula.ru

/ Маркин Алексей Александрович /

03 декабря 2019 г.

Подпись А.А. Маркина удостоверяю:

М.П.

