

ОТЗЫВ

официального оппонента 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

Диссертационная работа А.И. Швейкина посвящена развитию многоуровневых моделей для описания деформирования поликристаллических металлов и сплавов. Необходимость разработки таких моделей обусловлена в первую очередь тем, что макроскопические модели не включают описание изменения структуры материала, которая при разных нагружениях меняется различным образом. Поэтому при формулировке макрофеноменологических моделей пластичности, пригодных для описания широкого спектра нагружений, характерного для реальных технологических процессов обработки металлов давлением, возникает необходимость использования в модели достаточно сложных операторов с множеством параметров (например, многоповерхностные теории пластического течения с анизотропным и кинематическим упрочнением, эндохронная теория пластичности, теория упруго-пластических процессов А.А. Ильюшина и др.). Идентификацию и верификацию таких макроскопических моделей существенно осложняет имеющаяся в МДТТ фундаментальная проблема экспериментального исследования сложного нагружения при больших деформациях. Кроме того, в макроскопических моделях отсутствует возможность описания изменяющихся при эволюции структуры физико-механических свойств, что необходимо для определения свойств получаемых при обработке изделий. Поэтому в последние десятилетия интенсивно развиваются многоуровневые модели неупругого деформирования поликристаллических металлов. Среди исследований российских ученых основополагающими являются работы В.А. Лихачева, В.Г. Малинина, В.Е. Панина, В.В. Рыбина, за рубежом такие модели называются «*crystal plasticity*» и приводятся в большой доле публикаций профильных журналов.

Хотя многоуровневые модели пластичности к настоящему времени достаточно развиты (к сожалению – в основном работами зарубежных исследователей), в этой области есть ряд нерешенных и/или спорных вопросов. Автор в основной части работы рассматривал важные вопросы обоснованной формулировки геометрически нелинейных кинематических и определяющих соотношений и вопрос обобщения моделей путем расширения множества учитываемых механизмов деформирования (необходимых для описания структурной сверхпластичности). Это обосновывает несомненную **актуальность исследования**.

Предложенные варианты решения указанных вопросов в совокупности с остальными основными результатами (сопоставление предложенных моделей с известными, методика оценки чувствительности, анализ закономерностей процессов деформирования с использованием предложенных моделей) обеспечивают **научную новизну** исследования, а также определяют его **теоретическую значимость**.

Практическая значимость заключается в применимости предложенных моделей для совершенствования процессов обработки металлов методами интенсивных пластических деформаций, что обуславливается способностью моделей к описанию эволюционирующих физико-механических свойств материала.

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 включает 467 ссылок на известные работы в рассматриваемой области исследования.

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, дается характеристика степени ее разработанности. Сформулированы цель и задачи работы. Характеризуются научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, подходы и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности, апробация результатов исследований. Приведено краткое описание содержания глав диссертационной работы.

В **главе 1** представлены результаты анализа современного состояния в области моделирования неупругого деформирования моно- и поликристаллических металлов и сплавов. Рассматриваются основные подходы к формулировке определяющих соотношений, приводится аргументация, что для решения поставленных в работе задач предпочтительно использовать физический подход, который далее описывается более подробно. Приводится обзор многоуровневых моделей поликристаллических металлов и сплавов с обозначением важных нерешенных вопросов.

Глава 2 содержит описание двухуровневых моделей в скоростной форме в терминах актуальной конфигурации. Используется геометрически нелинейная формулировка с коротационной производной (конкретный вид производной обосновывается в главе 3, альтернативные варианты рассматриваются и сопоставляются в главах 4 и 5). Модель является статистической, для передачи воздействий с макроуровня на мезоуровень используется обобщенная гипотеза Фойгта (принимается однородность градиента скорости перемещений), принимается однородность температуры и скорости ее изменения. В отличие от классических статистических моделей, рассматривающих зерна обособленно, в предлагаемых учитывается их соседство, как отдельные объекты рассматриваются границы между ними (используются при рассмотрении упрочнения и ротаций решеток кристаллитов).

В качестве механизмов формоизменения рассматриваются ротации решеток (связаны с определением коротационной производной) и внутризеренное скольжение краевых дислокаций по кристаллографическим системам скольжения, для описания последнего используются или вязкопластические соотношения, или предложенная модификация пластической модели Линя.

В **главе 3** рассматриваются формулировки геометрически нелинейных моделей МДТТ, на основе анализа которых делаются следующие выводы: предпочтительна формулировка определяющих соотношений в актуальной конфигурации в скоростях с использованием коротационных производных; отсутствуют физические обоснования для применения популярных коротационных производных для анизотропных материалов; существующие подходы к формулировке скоростных соотношений в актуальной конфигурации не принимают во внимание изменение структуры материала, в частности,

текстурирование поликристаллических металлов и сплавов. Поэтому автором предлагается новый подход к построению кинематических и скоростных определяющих соотношений для поликристаллических металлов и сплавов при больших градиентах перемещений, основанный на использовании многоуровневого моделирования.

Базовой идеей является явное выделение в мультипликативном разложении транспонированного градиента места (градиента деформации) на мезоуровне движения подвижной системы координат, связанной с элементами симметрии (решетки) кристаллита. С использованием этого представления движения сформулированы определяющие соотношения в решеточной разгруженной конфигурации, для которых выполняются требования отсутствия гистерезиса напряжений и диссипации энергии при произвольном упругом деформировании. Для металлов и сплавов (для случая малых упругих искажений) обоснован переход к определяющим соотношениям в актуальной конфигурации с использованием аддитивного разложения градиента скорости перемещений – показано, что формулировки дают близкие результаты (это подтверждено в главе 5 численными результатами).

В **главе 4** приводятся формулировки известных в литературе моделей мезоуровня, входящих в состав двухуровневых моделей физических теорий пластичности. Они сопоставлены с предложенными в работе, показано, что модели должны давать близкие численные результаты. Приведена полная постановка задачи моделирования представительного объема макроуровня для предложенной формулировки конститутивной модели в скоростной форме в актуальной конфигурации, сформулирована постановка краевой задачи для описания технологических процессов с использованием многоуровневой конститутивной модели материала.

В **главе 5** представлен алгоритм численной реализации двухуровневой модели, анализируются численные результаты моделирования неупругого деформирования отдельных кристаллитов и поликристаллов при различных нагружениях.

Сопоставление результатов, полученных при применении разных формулировок моделей мезоуровня (предложенных в главах 2,3 и известных описанных в главе 4), подтвердило их близость. Последнее объясняет отсутствие существенных отличий получаемых в разработанных моделях результатов с опубликованными другими авторами экспериментальными данными. Однако именно предложенный в главе 3 подход позволяет теоретически обоснованно перейти к близкой формулировке в скоростной форме в актуальной конфигурации, которая является предпочтительной как для численного решения краевых задач с изменяющимися контактными условиями, так и для построения расширенных многоуровневых моделей с учетом дополнительных механизмов деформирования (используется в главе 6 при построении модели для описания сверхпластичности).

Приводится методика оценки чувствительности моделей к возмущениям входных данных. Результаты ее применения для исследования двухуровневых моделей свидетельствуют об устойчивости к возмущениям рассмотренных параметров.

Глава 6 посвящена формулировке соотношений и алгоритмов реализации многоуровневой модели, учитывающей механизм зернограницного скольжения и способной описать деформирование в режиме структурной сверхпластичности. Приводится достаточно

подробный обзор экспериментальных исследований сверхпластичности, на основе которого предлагается сценарий многостадийной реализации одноосного испытания с выходом в режим сверхпластичности, включающие описание изменения напряженно-деформированного состояния, ролей механизмов (с учетом их взаимодействий) и эволюции структуры. Анализируются существующие модели, обосновывается необходимость создания многоуровневой модели, позволяющей в рамках единой модели описывать различные режимы деформирования и переходы между ними.

Приводится описание соотношений предложенной трехуровневой модели, сформулированной на основе двухуровневой модели в скоростной форме в актуальной конфигурации, описанной в главах 2 и 3. Модель включает описание внутризеренного скольжения краевых дислокаций, ротаций (решеток) кристаллитов, зернограничного скольжения (ЗГС) и динамической рекристаллизации.

Для описания зернограничного скольжения в модель вводится дополнительный структурный уровень, на котором рассматриваются границы кристаллитов и возможные смещения по ним. Континуализация этих смещений на весь представительный объем макроуровня позволяет перейти к описанию деформирования за счет ЗГС по аналогии с внутризеренным деформированием – путем рассмотрения сдвигов и их скоростей, при этом используя аналогичную форму соотношений. Ключевым элементом при таком подходе является задание изменения критических напряжений (внутренних переменных, характеризующих уровень касательных напряжений, необходимых для реализации ЗГС). Предлагаются соответствующие соотношения с учетом нескольких факторов, определенных на основе физического анализа опубликованных экспериментальных данных; в частности, отмечается необходимость учета процесса динамической рекристаллизации, выхода растворенных частиц на границы кристаллита, механического и диффузионного выглаживания, повышения энергии границ в результате притока решеточных дислокаций.

Поскольку детальное моделирование рекристаллизации затруднительно, предлагается приближенное описание: вводится «эффективное» зерно, объединяющее свойства рекристаллизованного зерна и нерекристаллизованного зерна (используется свойство статистичности модели и смесевой подход), рост доли нерекристаллизованного объема задается на основе экспериментальных данных.

Идентификация и верификация модели проведена для одноосных испытаний промышленного сплава 1420. Результаты показывают, что модель адекватно описывает стадийные кривые растяжения и воспроизводят сложный сценарий процесса деформирования в испытаниях на одноосное растяжение с выходом в режим сверхпластичности. Представлены результаты моделирования для других видов нагружения (простого сдвига, сложного нагружения) для образцов из сплава 1420, показано, что они согласуются с физическими соображениями.

Заключение содержит описание основных полученных результатов и выводов по итогам выполненного исследования, рекомендаций по применению результатов и перспектив дальнейшей разработки темы.

На основе анализа диссертации можно утверждать следующее:

– научные положения, представленные в работе, обладают **высокой степенью обоснованности**,

– использование известных положений нелинейных МДТТ и ФТТ, применение апробированных численных методов, полученные численные оценки чувствительности моделей по отношению к возмущению входных данных, соответствие расчетных результатов и экспериментальных данных обеспечивают **высокую степень достоверности**,

– вся представленная в заключении информация является **обоснованной**.

При ознакомлении с диссертационной работой возникли следующие **замечания и вопросы**:

1. При формулировке определяющих соотношений для макроуровня в диссертации записано соотношение, означающее, что тензор упругих констант макроуровня является средним значением таких тензоров для мезоуровня. Однако, по логике построения многоуровневых моделей, законы действия различных механизмов деформации формируются (и, следовательно, их нужно записывать) только на микро или мезоуровне.
2. Количество зерен, составляющих представительный объем макроуровня, логично рассматривать, как характеристику материала. В диссертации автор стремился выбрать его как можно большим и не анализировал его влияние на расчетные значения деформации.
3. Автор утверждает, что в разработанной модели учитывается движение только краевых дислокаций. Вместе с тем, в модели практически ничего не изменится, если рассмотреть также движение и винтовых и смешанных дислокаций.
4. В разных местах диссертации автор использует упругий градиент деформации, упругий тензор деформации Грина, упругий градиент скорости. Введение такого большого количества упругих величин представляется непоследовательным, поскольку упругой следует называть только ту величину, которая является аргументом упругой энергии.
5. Неясно, почему модель, включающая описание зернограницного проскальзывания, классифицирована как трехуровневая. Действительно, деформация и напряжение на верхнем уровне должны быть связаны с усреднением этих полей по объемам более низкого уровня. Добавление же новых элементов структуры – границ зерен – и статистический учет взаиморасположения зерен не означает введения нового масштабного уровня, как и сам автор не считает введением нового масштабного уровня введение понятия эффективного зерна.
6. Для описания зернограницного проскальзывания в фасетке границы вводятся векторы возможного сдвига, при этом не сказано, как выбираются векторы возможного сдвига в фасетке границы. Зависят ли результаты моделирования от выбора направлений этих векторов?
7. Имеется ряд неудачных предложений и формулировок.
 - а) желательно ставить скобки в выражениях вида $(\nabla v)^T$;
 - б) соотношение (4.1.2) определяет не пластическую составляющую градиента деформации, а пластическую составляющую градиента скорости;
 - в) на с. 125 говорится об усреднении по второй паре индексов, тогда как использованной инвариантной форме записи тензоров, индексов нет;

г) на с. 124 говорится о тензоре спина квазитвердого вращения, преобразованного в базис актуальной решеточной конфигурации. Такая терминология представляется неудачной, так как неясно, что значит преобразовать тензор в какой-то другой базис.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации, которая является оригинальной, цельной и завершенной научно-квалификационной работой. Содержательные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в значительном числе статей в известных журналах, обсуждались на большом количестве конференций и семинаров. Текст автореферата соответствует диссертации. Тема и содержание диссертации соответствуют специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела, диссертация содержит новые научные результаты, совокупность которых можно характеризовать как научное достижение в данной области.

Таким образом, 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.

Профессор кафедры теории упругости
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
Санкт-Петербургский Государственный Университет
д.ф.-м.н.
Евгеньевич

Волков Александр

199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб. д.7-9
a.volkov@spbu.ru Тел. +7 (812) 4287079

Личную подпись
начальника
И. И. МАШТА



Документ подготовлен
в порядке исполнения
трудовых обязанностей