



УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Институт физики
прочности и материаловедения
Сибирского отделения Российской
академии наук, доктор технических наук


Е.А. Колубаев

« 26 » *ноября* 2019 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

На отзыв представлены: диссертация на 302 страницах машинописного текста, включающая 66 рисунков и 6 таблиц, список цитируемой литературы содержит 467 наименования; автореферат диссертации на 32 страницах, включающий список из 24 основных публикаций автора по теме диссертационной работы, в том числе 20 – в ведущих научных журналах из списка, рекомендованного ВАК для публикации материалов диссертаций, и в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 4 статьи – в сборниках материалов конференций, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и/или Web of Science, 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. При подготовке отзыва были рассмотрены публикации автора из открытых научных изданий. Основное содержание диссертации нашло отражение в этих публикациях.

Актуальность темы исследования

В современных представлениях нелинейной механики и физики твердого тела материал рассматривается как сложноорганизованная система, изменение которой при воздействиях осуществляется на разных масштабных и структурных уровнях с учетом взаимосвязей между ними; при этом эффективные физико-механические свойства на макроуровне определяются

состоянием внутренней структуры. Из вышесказанного следует, что для разработки современных технологий термомеханической обработки необходимо использовать модели материалов, способные описывать изменение структуры. В связи с этим особую значимость имеет разработка многоуровневых моделей, учитывающих вклады деформационных механизмов, реализуемые носителями пластической деформации разной природы и масштаба, и их взаимовлияние в процессе нагружения. К настоящему времени достаточно много моделей данного класса предложено как в России (в частности, в томской научной школе В.Е. Панина – с акцентом на рассмотрении мезомеханики), так и за рубежом; в диссертации приведен детальный обзор текущего состояния в данном научном направлении, имеющий отдельную научную ценность (на его основе выделены значимые нерешенные вопросы в данной области). Так, важными направлениями развития многоуровневых моделей материалов остаются обоснованная формулировка геометрически нелинейных кинематических и определяющих соотношений (поскольку для большинства технологических процессов термомеханической обработки металлов и сплавов характерны большие градиенты перемещений) и включение в модели учета других, помимо учитываемых в известных моделях, механизмов деформирования и их взаимодействий. В частности, для исследования перспективных технологических процессов, основанных на использовании деформирования в режиме структурной сверхпластичности, позволяющих получать детали сложной формы малым числом операций с исключением сварки, важным является учет зернограничного проскальзывания и рекристаллизации, процессов механического и диффузионного выглаживания границ, взаимодействия всех механизмов. Основной целью диссертационной работы А.И. Швейкина было развитие аппарата многоуровневых моделей по данным направлениям, что свидетельствует о несомненной **актуальности исследования** как для теоретического развития нелинейной механики деформируемого твердого тела, так и с точки зрения применимости результатов работы для усовершенствования технологий термомеханической обработки.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, списка сокращений и основных обозначений, шести глав, заключения, списка использованной литературы.

Во **введении** приводится обоснование актуальности выбранной темы исследования и характеристика степени ее разработанности, цель и задачи работы, обозначается научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, подходы и методы исследования, положения, выносимые на

защиту, представлена информация о степени достоверности и об апробации результатов.

В **главе 1** содержится выполненный автором анализ современного состояния в области моделирования неупругого деформирования моно- и поликристаллических металлов и сплавов. В результате анализа основных подходов к формулировке определяющих соотношений для решения задач диссертационного исследования обоснованно выбирается физический подход с явным учетом механизмов деформирования. Приводится краткий обзор существующих многоуровневых моделей материалов, по итогам которого выделены основные нерешенные вопросы в данной области. Поскольку исследование посвящено их решению, тем самым обоснована актуальность работы. В главе 1 и остальных частях обзора, представленных в разделах 3.1 и 6.1, цитируется множество важных работ в данной области, включая значительное число публикаций последних десятилетий, что свидетельствует о глубоком знании современного состояния проблемы. Список цитируемой литературы содержит 467 ссылок.

В **главе 2** рассматриваются двухуровневые модели неупругого деформирования поликристаллов. Для описания внутризеренного дислокационного скольжения предлагается использование упруговязкопластической и упругопластической моделей (модификации модели Линя для геометрически нелинейного случая).

Глава 3 содержит обзор существующих проблем при построении геометрически нелинейных моделей механики деформируемого твердого тела (МДТТ). Обосновывается предпочтительность формулировки определяющих соотношений в актуальной конфигурации в скоростях с использованием коротационных производных, поскольку такая формулировка эффективна для решения краевых задач с изменяющимися контактными граничными условиями и дальнейшего совершенствования моделей материалов с учетом дополнительных механизмов деформирования в случае расширения диапазона воздействий (пример приведен в главе 6). Отмечается, что существующие макрофеноменологические подходы не принимают во внимание текстурирование материала при деформировании. В диссертационной работе предлагается новый подход к построению кинематических и скоростных определяющих соотношений для поликристаллических металлов и сплавов при больших градиентах перемещений, основанный на использовании многоуровневого моделирования и определении квазитвердого движения на мезоуровне путем связи соответствующей жесткой подвижной системы координат с симметричными элементами кристаллита.

В главе 4 предложенные соотношения мезоуровня аналитически сопоставляются с известными в литературе, показана близость результатов. При этом отмечается, что именно предложенный подход позволяет теоретически обоснованно перейти к формулировке в скоростной форме в актуальной конфигурации. Приведена соответствующая постановка краевой задачи для описания технологических процессов.

Глава 5 содержит описание алгоритма численной реализации двухуровневой модели. Приведены численные результаты, полученные с использованием разных двухуровневых моделей при различных нагружениях отдельных кристаллитов и поликристаллов. Описывается методика оценки чувствительности моделей к возмущениям входных данных, приведенные результаты ее применения для двухуровневых моделей свидетельствуют об их устойчивости к возмущениям рассмотренных параметров.

В главе 6 приведен обзор экспериментальных и теоретических исследований деформирования с выходом в режим структурной сверхпластичности. Совместно с соавторами публикаций (научным консультантом П.В. Трусовым и Э.Р. Шарифуллиной) систематизированы результаты экспериментов: выявлено, что наблюдаются различные стадии деформирования, предшествующие режиму сверхпластического течения, входу и выходу из него, проанализированы вклады различных механизмов деформации и особенности эволюции микроструктуры на разных стадиях нагружения. В результате проведенного анализа предложен «сценарий», реализующийся при испытаниях на одноосное нагружение в режиме сверхпластичности, включающий совокупность описаний изменяющихся параметров напряженно-деформируемого состояния, вкладов различных механизмов и состояния структуры.

Предложена трехуровневая модель, в которой учтены механизмы внутризеренного дислокационного скольжения, ротаций решеток кристаллитов, зернограничное проскальзывание, динамическая рекристаллизация, механическое и диффузионное выглаживание границ зерен, повышение энергии границ в результате притока решеточных дислокаций и взаимодействия между механизмами. В рамках развития двухуровневой модели для описания условий сверхпластичности в рассмотрение вводятся границы зерен как особый структурный уровень, обеспечивающий возможность учета зернограничного скольжения. В работе отдельно рассмотрены кинематические, определяющие и эволюционные соотношения для каждого масштабного уровня и законы их согласования. Особый интерес представляет описание поведения границ зерен и интеграция построенных соотношений в общую трехуровневую модель.

Процедура идентификации параметров модели рассмотрена на примере алюминиевого сплава 1420 для скорости нагружения 10^{-3}с^{-1} . Для идентификации используется как информация об экспериментально определенном изменении НДС, так и другие составляющие построенного сценария (данные о вкладах механизмов и изменении структуры). Для верификации параметров модели проведен расчет одноосного нагружения при скорости деформации 10^{-2}с^{-1} . Сравнение макроскопических кривых нагружения для двух рассмотренных скоростей деформации с экспериментальными данными показало достаточно хорошее количественное и качественное соответствие; полученная при моделировании информация об изменении полюсных фигур и характеристик зернограничного скольжения согласуется с разработанным сложным сценарием процесса, что свидетельствует о применимости предложенной многоуровневой модели для описания различных режимов деформирования и переходов между ними.

В **заключении** содержатся описание основных полученных результатов и выводы, подтверждающие достижение поставленной цели исследования, рекомендации по применению результатов, обозначены перспективы дальнейшей разработки темы.

Характеристика научной новизны, достоверности, научной и практической значимости результатов

Научная новизна исследования определяется, главным образом, развитием подхода к формулировке геометрически и физически нелинейных кинематических и определяющих соотношений многоуровневых моделей материалов для общего случая изменения симметричных свойств на макроуровне и созданием с его использованием новых двух и трехуровневых моделей для описания упругопластического, упруговязкопластического и сверхпластического деформирования металлов и сплавов; отдельную ценность представляет созданный на основе анализа множества разрозненных экспериментальных данных сценарий реализации процесса испытания с выходом в режим сверхпластичности. Перечисленное определяет и **теоретическую значимость** работы – предлагаются физически обоснованные формулировки многоуровневых моделей, расширяется спектр воздействий, которые можно анализировать с их использованием. Предложенная структура многоуровневой статистической модели с введением промежуточного структурного уровня может использоваться для построения моделей материалов других классов (например, композитов).

К положительным сторонам работы стоит отнести тот факт, что идентификация параметров моделей проведена на реальных материалах, используемых в промышленности; удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных результатов подтверждает **достоверность** последних, а также корректность разработанных моделей. Высокая степень достоверности результатов и выводов также обеспечивается корректным использованием положений нелинейной механики и физики деформируемого твердого тела, мезомеханики, применением апробированных эффективных численных методов, удовлетворительной сходимостью численных методов, и тем, что оценки чувствительности моделей к возмущениям входных данных свидетельствуют об их устойчивости.

Практическая значимость состоит в возможности применения моделей и созданного собственного комплекса программ для их реализации на ЭВМ для анализа процессов пластического и сверхпластического деформирования материалов в относительно широких температурно-скоростных диапазонах, что необходимо для усовершенствования технологий термомеханической обработки. Результаты диссертационной работы могут быть использованы для указанных целей в научно-исследовательских организациях РАН (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г.Москва; Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа; Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь; Институт механики УрО РАН, Ижевск; Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск; и др.), высших учебных заведениях (Пермский национальный исследовательский политехнический университет; Национальный исследовательский Томский политехнический университет; Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова; Санкт-Петербургский государственный университет; и др.), производственных предприятиях металлургической, машиностроительной и авиастроительной отраслей, реализующих технологии термомеханической обработки.

Замечания и вопросы по диссертации

1. По итогам обзора существующих многоуровневых моделей материалов в главе 1 (стр.1) делается вывод: «Для моделирования технологических процессов в настоящее время наиболее эффективными являются статистические модели». Автору следовало бы подкрепить этот вывод сравнительными оценками вычислительных затрат при решении краевых задач с использованием статистических и прямых моделей материалов.

2. В работе рассматриваются статистические многоуровневые модели, усовершенствованные с учетом взаиморасположений зерен и границ между

ними. На стр.72 при описании задаваемой топологии отмечено: «Обычно при реализации предлагаемых в настоящей работе моделей рассматривалось 26 фасеток границ у кристаллитов: принималось, что топология соответствует виртуальной кубической укладке зерен по типу кубика Рубика...» Но в тексте диссертации не найдено фрагментов, где бы описывались результаты с иной закладываемой топологией. Следовало их привести, сопроводив необходимыми пояснениями, в частности, обозначив минимальное число навязываемых в статистической выборке границ у каждого зерна, после увеличения которого определяемое в модели НДС макроуровня изменяется пренебрежимо мало.

3. Одним из важных вопросов при применении статистических моделей для описания отклика поликристаллов является определение количества зерен, необходимых для того, чтобы объем был представительным на макроуровне. В работе (с. 188) утверждается, что «значение макронапряжений и вид полюсных фигур перестает зависеть от числа кристаллитов» при количестве зерен более 200. Автору следовало привести результаты численных исследований для подтверждения этого вывода.

4. В незначительном количестве имеются опечатки (например, в автореферате вместо «п. 5.4» на стр.18 должно быть «п. 5.2», на стр.7 диссертации «актуальной являются задачи»).

Заключение по диссертации

Перечисленные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации А.И. Швейкина и его квалификации. Сформулированная цель исследования достигнута, все поставленные задачи решены. Диссертация хорошо структурирована, является оригинальной, завершенной научно-квалификационной работой, выполнена на высоком научном уровне, содержит новые научные положения, совокупность которых можно характеризовать как научное достижение в области нелинейной механики деформируемого твердого тела. Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в достаточном числе статей в известных журналах, апробированы на множестве Международных и Всероссийских конференций и семинаров. Содержание автореферата соответствует диссертации.

Диссертация Швейкина Алексея Игоревича «Многоуровневые модели для описания пластического и сверхпластического деформирования поликристаллических металлов и сплавов» полностью 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.

Диссертационная работа и отзыв на нее рассмотрены и обсуждены, отзыв одобрен на заседании научного семинара лаборатории механики структурно-неоднородных сред Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (протокол № 5 от 25 ноября 2019 г.).

Отзыв составили:

Ведущий научный сотрудник лаборатории механики структурно-неоднородных сред Института физики прочности и материаловедения СО РАН,
доктор физико-математических наук
(01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела)

 Романова Варвара Александровна

Заведующий лабораторией механики структурно-неоднородных сред Института физики прочности и материаловедения СО РАН,
доктор физико-математических наук
(01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела)


 Балохонов Руслан Ревович

Подписи В.А.Романовой и Р.Р. Балохонова заверяю:

Ученый секретарь ИФПМ СО РАН

к.ф.-м.н



 Н.Ю. Матолыгина

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)
Адрес: 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4
Телефон: +7 (3822) 286-937 Факс: +7 (3822) 49-25-76.
E-mail: varvara@ispms.tomsk.ru (В.А. Романова)