

## **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

### **Структура диссертации и основные научные результаты**

Диссертация состоит из введения, списка сокращений и основных обозначений, шести глав, заключения, списка цитируемой литературы из 467 ссылок. Работа изложена на 302 страницах, включает 66 рисунков и 6 таблиц.

**Введение** содержит информацию об актуальности темы исследования, степени ее разработанности, цели и задачах работы, научной новизне, теоретической и практической значимости, использованных подходах и методах исследования, выносимых на защиту положениях, степени достоверности, апробации результатов исследований. Краткое описывается содержание глав.

**В первой главе** приведен обзор литературных данных о существующих подходах и проблемах в области моделирования деформирования металлов и сплавов. Показана целесообразность использования многоуровневых моделей, поскольку они позволяют описывать изменение структуры материала при его деформировании. Выделены существенные для развития этого теоретического аппарата вопросы, которые рассматриваются в следующих главах.

**Во второй главе** приводятся статистические двухуровневые модели для описания поведения поликристаллических металлов и сплавов при термомеханических воздействиях. Основным механизмом необратимого деформирования, как и в известных моделях этого класса, является внутризеренное скольжение краевых дислокаций, также учитываются повороты кристаллических решеток зерен. Отличием моделей от традиционных статистических является учет взаиморасположений зерен и границ между ними.

Для учета геометрической нелинейности в модели мезоуровня предлагается использование новой коротационной производной, описание которой изложено в главе 3. Подробно описывается предложенная модификация пластической модели Линя.

**Третья глава** содержит обзор работ, посвященных важным аспектам построения нелинейных моделей механики деформируемого твердого тела (МДТТ). В качестве основной проблемы автор обозначает то, что в существующих подходах к формулировке скоростных определяющих соотношений в актуальной конфигурации не учитывается изменение типа анизотропии материала в результате текстуробразования. Акцент на соотношениях этого типа обосновывается автором их предпочтительностью как для численного решения краевых задач с изменяющимися контактными условиями, так и для построения модификаций многоуровневых моделей с учетом дополнительных механизмов деформирования. Расширенная модель с такой структурой описывается в главе 6. Предлагается новый подход для формулировки таких соотношений: используется двухуровневая модель, на уровне кристаллита новая коротационная производная определяется с использованием подвижной системой координат, связанной с элементами симметрии.

В **четвертой главе** разработанные автором соотношения мезоуровня аналитически сопоставляются с известными в литературе и показана близость получаемых численных результатов. Записаны полные постановки задачи моделирования представительного объема и краевой задачи для описания технологических процессов с использованием многоуровневой модели материала.

В **пятой главе** приведен алгоритм численной реализации двухуровневой модели, описаны и проанализированы полученные результаты моделирования неупругого деформирования монокристаллов и поликристаллов. Данные результаты при использовании предлагаемых и известных в литературе соотношений мезоуровня оказались близки (для некоторых моделей это

показано аналитически в главе 4). Автор акцентирует внимание на том, что именно предложенный в главе 3 подход позволил обоснованно перейти к близкой формулировке в скоростной форме в актуальной конфигурации. Описана методика оценки чувствительности многоуровневых моделей материалов к возмущениям входных данных и приведены результаты ее применения для исследования двухуровневых моделей, которые показывают их устойчивость к возмущениям рассмотренных параметров.

**Шестая глава** содержит подробное описание предложенной новой расширенной трехуровневой модели с возможностью описания структурной сверхпластичности и результатов ее применения.

Приведен обзор экспериментальных и теоретических работ. На этой основе впервые предложен трехэтапный комплексный сценарий реализации одноосного испытания с указанием ролей взаимодействующих механизмов и изменения структуры. Аргументирована необходимость создания многоуровневой модели материала.

Предлагаемая модель включает описание внутризеренного скольжения краевых дислокаций, ротаций кристаллитов, зернограничного скольжения и динамической рекристаллизации, взаимодействия этих механизмов, учитывается механическое и диффузионное выглаживание границ зерен. При формулировке соотношений автор ссылается на известные в литературе сведения из физики твердого тела.

Модель идентифицирована для промышленного сплава 1420 при одной начальной скорости деформации в испытании с выходом в режим сверхпластичности, а верифицирована при другой скорости деформации. Результаты демонстрируют адекватность модели. Она хорошо описывает стадийные кривые растяжения и сложный сценарий реализации процесса деформирования.

**В заключении** приводится описание основных полученных результатов и выводов по итогам выполненного исследования, рекомендаций по применению результатов и перспектив дальнейшей разработки темы.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

### **Актуальность темы диссертационного исследования**

В современных условиях совершенствование технологий изготовления изделий из металлических материалов методами термомеханической обработки в значительной мере опирается на применение математических моделей МДТТ для исследования и компьютерного моделирования этих процессов. При термомеханической обработке важно не только получить требуемую геометрическую форму изделия, но и обеспечить формирование необходимой структуры материала, которая определяет возможность реализации технологического процесса, в том числе в условиях сверхпластичности, и потребительские свойства изделия. В связи с этим актуальным является развитие многоуровневых моделей металлов и сплавов, способных описывать изменение структуры и определяемых ее состоянием эффективных (эксплуатационных) свойств материала при значительном неупругом, в частности, сверхпластическом, деформировании. На основе приведенного в работе обзора литературы автором выделены важные для совершенствования таких моделей материалов вопросы. Среди них основными являются формулировка обладающих ясным физическим смыслом геометрически нелинейных определяющих соотношений и включение в них описания дополнительных к внутризеренному дислокационному скольжению механизмов деформирования. Это позволит моделировать и исследовать более широкий круг технологических процессов. Нацеленность на их решение свидетельствует об **актуальности исследования.**

### **Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

В работе использованы известные положения нелинейных МДТТ и физики твердого тела, апробированные численные методы интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений, решения систем нелинейных алгебраических уравнений, оптимизации. Проведено исследование, показавшее устойчивость моделей по отношению к входным

данным. Результаты расчетов соответствуют экспериментальным данным. Совокупность указанных факторов обеспечивают **достоверность** результатов исследования.

По всем защищаемым положениям диссертации приводится достаточное **обоснование**. Представленное в заключении описание основных полученных результатов и выводов по итогам выполненного исследования, рекомендаций по применению результатов и перспектив дальнейшей разработки темы соответствует содержанию глав диссертации и является **обоснованным**.

### **Научная новизна основных результатов работы, их теоретическая и практическая значимость**

**Научная новизна** работы заключается в предложенном подходе к формулировке геометрически нелинейных кинематических и определяющих соотношений многоуровневых моделей, разработанных новых двухуровневых и трехуровневых моделях неупругого и сверхпластического деформирования металлов и сплавов, результатах их применения для исследования процессов простого и сложного нагружения, оценки чувствительности моделей к возмущениям входных параметров.

Предложенные автором диссертации решения достаточно аргументированы, сопоставлены и оценены по сравнению с другими известными решениями.

**Теоретическая значимость** исследования определяется развитием многоуровневых моделей материалов.

**Практическая значимость** работы связана с тем, что разработанные автором модели и программные комплексы, их реализующие, могут использоваться при разработке технологических процессов обработки металлов методами интенсивного, в частности, сверхпластического деформирования.

## **Опубликование и апробация основных результатов исследований, представленных в диссертации**

Основное содержание диссертации опубликовано в 23 ведущих научных журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, установленный Министерством образования и науки Российской Федерации для представления результатов докторских диссертаций и/или индексируемых в международных базах данных, а также в 9 международных изданиях материалов конференций.

Результаты, выносимые на защиту, прошли широкую апробацию, в частности, обсуждались на 24 Международных и Всероссийских конференциях.

### **Замечания по диссертации**

1. Рост зерен за счет рекристаллизации при одноосном испытании закладывается в модель в виде аппроксимации экспериментальных данных (стр. 224). Это несколько противоречит исходному посылу, что преимуществом многоуровневых физических моделей является возможность описания изменения структуры материала. Насколько значительным будет усложнение модели, когда в нее будет включено явное описание рекристаллизации?
2. Следовало дать точное определение «зернограничной диффузии» (стр. 230). В работе под этим понимается массоперенос на микроуровне, способствующий выглаживанию границы и, следовательно, уменьшению сопротивления зернограничному сдвигу. Однако под данным термином можно было бы понять и движение межзеренной границы в ходе процесса рекристаллизации.
3. Судя по дате зарегистрированной диссертантом программы (2013 г.) с моделью материала для коммерческого пакета на основе метода конечных элементов и цитируемой на стр. 81 диссертации своей публикации, автор достаточно давно осуществлял решения краевых задач с использованием многоуровневых моделей. К сожалению, в тексте диссертации присутствует только постановка этих задач и краткое описание методов их решения,

результаты не описываются. По-видимому, это связано со стремлением сделать текст диссертации достаточно компактным, уделив необходимый объем положениям, определяющим ее научную новизну. Представляется, что результаты решения краевых задач наглядно бы продемонстрировали возможности предлагаемых многоуровневых моделей материалов.

4. В разработанных автором компьютерных программах используется метод конечных элементов (МКЭ) для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) на макроуровне. В конечных элементах, таких, как четырехугольник и гексаэдр, используется более одной точки интегрирования Гаусса. Хорошо известно, что вычисляемые при этом в МКЭ значения компонент тензора напряжений существенно различаются между собой в точках интегрирования в конечном элементе вплоть до разницы в знаках. Является ли в концепции автора каждая точка интегрирования в элементе вместе с окружающим ее объемом материальной точкой макроуровня? Если да, то как связываются параметры НДС на макро- и мезомасштабных уровнях в разных точках интегрирования Гаусса в пределах одного конечного элемента?

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным  
Положением о присуждении ученых степеней**

Диссертационная работа Швейкина Алексея Игоревича «Многоуровневые модели для описания пластического и сверхпластического деформирования поликристаллических металлов и сплавов» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором на актуальную тему, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области построения нелинейных многоуровневых моделей определяющих соотношений механики

деформируемого твердого тела и алгоритмов решения краевых задач с данными определяющими соотношениями, имеющее важное значение для развития нелинейной механики деформируемого твердого тела.

Результаты научных исследований, выполненных автором, имеют теоретическую и практическую значимость. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Материалы диссертации опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК России.

Диссертация соответствует паспорту специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела», удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней (утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 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 технических наук, профессор,  
заведующий лабораторией механики деформаций  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Института машиноведения  
Уральского отделения Российской академии наук  
620049, Россия, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34,  
тел.+7 (343) 362-30-11, e-mail: avk@imach.uran.ru

А.В. Коновалов / Коновалов Анатолий Владимирович /

9 декабря 2019 г.

Подпись официального оппонента д.т.н. А.В. Коновалова удостоверяю,

Ученый секретарь ИМАШ УрО РАН, к.т.н.

А.М. Поволоцкая

