

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу Грибова Дмитрия Сергеевича  
«Физически-ориентированная трёхуровневая модель для исследования  
неупругого деформирования поликристаллов: описание сложного циклического  
нагружения материалов с различной энергией дефекта упаковки»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

### **Актуальность темы диссертационного исследования**

Интенсивное развитие высокотехнологичных производств требует разработки новых и совершенствование существующих технологий термомеханической обработки металлов и сплавов. Физические процессы, сопровождающие пластическую деформацию материалов весьма сложны, поэтому для их описания необходимы достаточно точные определяющие соотношения, корректно описывающие процессы, происходящие на мезо- и микроструктурном уровнях. Следует также отметить, что определяющие соотношения должны корректно описывать деформацию материалов в различных технологических процессах, в которых материалы испытывают сложное статическое или циклическое нагружения, сопровождаемые существенным ростом предела текучести или дополнительным циклическим упрочнением. С учетом того, что необратимые деформации материалов осуществляются на разных структурных уровнях, основной задачей построения корректных определяющих уравнений является построение многоуровневых моделей. Настоящая диссертация направлена на разработку трехуровневой модели, что, с учетом вышесказанного, подтверждает **актуальность** темы рассматриваемой диссертационной работы.

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

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, перечня основных сокращений и обозначений, списка литературы из 137

источников. Работа изложена на 111 страницах основного текста, включает в себя 25 рисунков и 7 таблиц.

**Введение** содержит информацию об актуальности темы исследования, степени ее разработанности, целях и задачах, научной новизне и значимости работы, теоретической и практической полезности и положениях, выносимых на защиту. Приведено краткое описание содержания глав.

В **первой главе** описаны основные физические механизмы изменения микроструктуры при деформировании материалов с различной энергией дефекта упаковки (ЭДУ), анализируются известные результаты экспериментальных исследований неупругого деформирования образцов из поликристаллических металлов и сплавов, описаны основные физические механизмы и особенности эволюции дефектной микроструктуры при простом и сложном, монотонном и циклическом нагружении образцов из сплавов. Представлен анализ моделей и области их применения.

Во **второй главе** описана концептуальная и математическая постановка задачи разработки 2-х уровневой (макро- и мезоуровень-1) упруговязко-пластической многоуровневой конститутивной модели (КМ), которая использована в настоящей работе в качестве базовой. Рассмотрены преимущества применения многоуровневых моделей для исследования пластического деформирования: универсальность, явное описание эволюции микроструктуры, применимость к проектированию функциональных материалов. Приведена математическая формулировка базовой 2-х уровневой модели: соотношения, классификация переменных и параметров модели.

**Третья глава** посвящена рассмотрению структуры модификации базовой модели – трехуровневой дислокационно-ориентированной модели для описания упруго-пластического деформирования поликристаллов, ее математической формулировки и алгоритмов реализации. Приведена концептуальная и математическая постановки подмодели мезоуровня-2, приведены кинетические уравнения для описания эволюции плотностей дефектов. Описаны связи параметров мезоуровня-2 и мезоуровня-1



В четвертой главе приведены описание и анализ результатов моделирования сложного монотонного и циклического деформирования поликристаллических образцов, произведена оценка адекватности модели на различных материалах и нагрузениях. С использованием численных экспериментов осуществлена проверка способности модели описывать явления, наблюдаемые при циклическом нагружении (выход амплитуд напряжений на стационарные значения при циклических нагружениях с фиксированными амплитудами деформаций, явление дополнительного циклического упрочнения, увеличение плотностей дефектов с появлением барьеров на расщеплённых дислокациях).

В заключении содержится описание основных полученных результатов и выводов по итогам выполненного исследования, приведены некоторые рекомендации по их использованию.

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

В диссертационной работе использованы известные положения механики деформируемого твердого тела, механики дискретных сред, мезомеханики. Решены ряд тестовых задач. Результаты расчетов соответствуют экспериментальным данным, что в совокупности с вышеуказанными факторами свидетельствует о достоверности результатов проведенных исследований.

Защищаемые положения диссертации в необходимой степени обоснованы. Основные научные положения и выводы, представленные в заключении, а также рекомендации по применению результатов и дальнейшего развития математических моделей соответствуют содержанию глав диссертации и являются аргументированными.

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

**Научная новизна** работы заключается в предложенном подходе к формулировке многоуровневой модели, включающей:

модификацию двухуровневой конститутивной модели за счет введения дополнительного уровня, построении замкнутой системы эволюционных уравнений для описания эволюции плотностей дефектов и введении в модель явного описания реакций по образованию барьеров Ломера – Коттрелла и Хирта на расщеплённых дислокациях;

формулировку закона упрочнения, включающего учёт взаимодействия дислокаций с барьерами различной природы;

получение с использованием разработанной модели новых результатов, позволяющих объяснить физическую природу явления дополнительного циклического упрочнения в материалах с низкой ЭДУ.

**Теоретическая значимость** диссертации определяется развитием многоуровневых моделей для исследования металлов и сплавов за счет включения дополнительного структурно-масштабного уровня, служащего для описания эволюции дефектной субструктуры.

**Практическая значимость** работы обусловлена тем, что разработанные автором математические модели и созданный на их основе программный комплекс (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020665918) могут быть использованы при разработке новых перспективных технологий и оптимизации существующих технологических процессов изготовления деталей из поликристаллических материалов в условиях сложного деформирования.

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

Основные результаты исследований, представленные в диссертации, опубликованы в 7 работах. В их число входят 6 статей из ведущих научных журналов, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, установленный Министерством образования и науки Российской Федерации



для представления результатов кандидатских диссертаций и в международные базы цитирования (WoS, Scopus, RSCI), свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Результаты, выносимые на защиту, прошли достаточно широкую апробацию на семинарах, конференциях, форумах различного уровня.

### **Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации и темы диссертации заявленной научной специальности**

Диссертация и автореферат имеют аналогичную структуру, обладают завершенностью в целом. Автореферат полностью отражает содержание диссертации и содержит основные цели и выводы, изложенные в диссертации.

Содержание диссертации и автореферата и основные положения, представленные в них, соответствуют паспорту специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, а именно следующим областям исследования:

- п. 4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»;
- п. 5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента»;
- п. 8 «Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования».

### **Замечания по диссертации**

1. В первой главе текст диссертации содержит очень подробное изложение теоретических основ используемых в разработанном программном комплексе методов. На мой взгляд, можно было ограничиться ссылками на основные работы по данному направлению.

2. Модели включают много переменных на разных структурных уровнях. Было бы полезно привести обобщающую таблицу переменных, которая позволит читателю более четко представить типы параметров и связи параметров модели на разных уровнях.

3. Следовало бы оценить вклад отдельных компонентов модели на результаты исследования процессов деформирования поликристаллических материалов, более подробно описать влияние различных параметров и выделить из них основные, определяющие технологические режимы обработки материалов.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации.

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

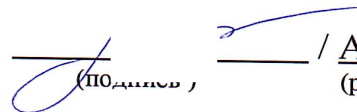
Диссертационная работа Грибова Дмитрия Сергеевича «Физически-ориентированная трёхуровневая модель для исследования неупругого деформирования поликристаллов: описание сложного циклического нагружения материалов с различной энергией дефекта упаковки», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в которой на основании проведенных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области построения многоуровневых моделей для описания процессов неупругого деформирования поликристаллов.

Результаты научных исследований, выполненных автором, имеют теоретическую и практическую значимость. Полученные результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Материалы диссертации в достаточной степени опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК Российской Федерации и входящих в зарубежные базы цитирования.



Диссертация соответствует паспорту специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней (утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Грибов Дмитрий Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Д-р физ.-мат. наук

 / А.В.Вахрушев  
(подпись) (расшифровка подписи)


Отзыв составлен: 11.11.2022 г.

Вахрушев Александр Васильевич, доктор физико-математических наук по специальности 01.02.04 (1.1.8) – Механика деформируемого твердого тела, профессор, главный научный сотрудник отдела моделирования и синтеза Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук.

426067, г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34119991, Россия, Москва,  
телефон: +73412214583, Моб. Телефон: 89124668029  
E-mail: Vakhrushev-a@yandex.ru

Подпись доктора физ.-мат. наук, профессора А.В. Вахрушева заверяю  
Ученый секретарь

Института механики УдмФИЦ УрО РАН,  
доктор технических наук, профессор

 А.И. Коршунов







РОВ  
 **БОРОНЦОВА О.С.**