

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

**Заключение диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19**

**по диссертации Грибова Дмитрия Сергеевича**

**на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук**

Диссертация «Физически-ориентированная трёхуровневая модель для исследования неупругого деформирования поликристаллов: описание сложного циклического нагружения материалов с различной энергией дефекта упаковки» по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите 14 октября 2022 года (протокол заседания № 7) диссертационным советом Д ПНИПУ.01.19, созданным по приказу ректора Пермского национального исследовательского политехнического университета № 35-О от 06.04.2022 г. в рамках реализации предоставленных ПНИПУ прав, предусмотренных абзацами вторым – четвертым пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» на основании распоряжения Правительства Российской Федерации от 23 августа 2017 г. № 1792-р.

Диссертация выполнена на кафедре «Математическое моделирование систем и процессов» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

**Научный руководитель** – доктор физико-математических наук, профессор Трусов Пётр Валентинович, заведующий кафедрой «Математическое моделирование систем и процессов» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

**Официальные оппоненты:**

1. Вахрушев Александр Васильевич – доктор физико-математических наук (специальность 01.02.04 – Механика деформирования твёрдого тела), профессор, главный научный сотрудник отдела моделирования и синтеза Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук».

2. Волков Александр Евгеньевич – доктор физико-математических наук (специальность 01.02.04 – Механика деформирования твёрдого тела), профессор, профессор кафедры теории упругости, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный университет.

**Ведущая организация** – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова»; отзыв ведущей организации утвержден директором, доктором технических наук, профессором Швейкиным Владимиром Павловичем, заслушан на научном семинаре отдела механики машин и технологий, и составлен профессором, доктором технических наук, главным научным сотрудником лаборатории механики деформаций Коноваловым Анатолием Викторовичем.

В диссертационный совет на диссертацию и автореферат диссертации поступило 6 положительных отзывов. В каждом отмечается актуальность выбранной темы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Первый отзыв поступил из Омского государственного технического университета, подписан профессором кафедры «Основы теории механики и автоматического управления», доктором технических наук, Корнеевым Сергеем Александровичем. Второй отзыв поступил из Москвы, из Института прикладной механики РАН, подписан главным научным сотрудником лаборатории «Неклассических моделей механики композитных материалов и конструкций», профессором, доктором технических наук, Лурье Сергеем Альбертовичем. Третий отзыв поступил из Нижнего Новгорода, из Научно-исследовательского института механики Национального исследовательского института механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета имени Н.И. Лобачевского, подписан главным научным сотрудником лаборатории математического моделирования и идентификации свойств материалов, заслуженным деятелем науки РФ, доктором физико-математических наук, профессором, Баженовым Валентином Георгиевичем. Четвертый отзыв поступил из Санкт-Петербурга, из Института проблем машиноведения РАН от главного научного сотрудника, зав лабораторией мат методов механики материалов доктора физико-математических науки, старшего научного сотрудника Фрейдина Александра Борисовича. Пятый отзыв поступил из Комсомольска-на-Амуре, ФГБУН Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения РАН, подписал его член-корреспондент РАН, доктора физико-математических наук Буренин Анатолий

Александрович. Шестой отзыв поступил из г. Томска, из Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, его подписали заведующий лабораторией механики структурно-неоднородных сред, доктор физико-математических наук Балахонов Руслан Регович и главный научный сотрудник лаборатории механики структурно-неоднородных сред доктор физико-математических наук Романова Варвара Александровна.

По теме диссертации соискателем опубликовано 10 научных трудов, в том числе 6 работ – в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени, из них 3 работы – в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования (Web of Science, Scopus), соискателем получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. В тексте диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах. Наиболее значимые публикации по теме диссертации:

1. Volegov P.S., Trusov P.V., **Gribov D.S.** Investigation of the features of polycrystals complex loading using a two-level crystal plasticity theory // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. –2015. –Vol.71 . – № 012071 (6 p./2 p.). (**Web of Science, Scopus**)

Соискателем приведены результаты реализации двухуровневой модели, позволяющей описать упрочнение материалов в ходе сложного циклического деформирования, показано соответствие полученных результатов данным натуральных экспериментов.

2. **Грибов Д.С.**, Трусов П.В. Трехуровневая упруговязкопластическая модель: анализ влияния величины энергии дефекта упаковки на отклик материалов при сложном нагружении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – №4. – С.60-73 (14 стр./ 7 стр.). (**Scopus**)

Соискателем (совместно с соавтором) предложена модификация существующей двухуровневой модели: добавлен третий структурный уровень для описания отклика представительного объёма кристаллита с учётом плотностей дефектов; соискателем разработан алгоритм реализации модели, проведён ряд численных экспериментов с использованием разработанной модели.

3. **Gribov D.S.**, Popov F.S., Trusov P.V. Three-level elastic-viscoplastic model: The influence of the evolution of the dislocation substructure on the behavior of polycrystals under complex cyclic loading // AIP Conference Proceedings. –2020. –Vol.2310, Is.1. –020114 (5 p./2 p.). (**Scopus**)

Представлено развитие трёхуровневой модели для описания отклика поликристаллических материалов, соискателем предложена модификация закона упрочнения. Разработана подмодель для описания влияния атомов примеси в законе упрочнения.

4. Trusov P.V., **Gribov D.S.** The three-level elastoviscoplastic model and its application to describing complex cyclic loading of materials with different stacking fault energies// Materials. – 2022. – Vol.15 (3). – № 760 (17 p./9 p.). (**Web of Science, Scopus**)

Представлена трёхуровневая модель для описания отклика поликристаллов; соискателем предложены соотношения для описания взаимодействия расщепленных дислокаций с образованием барьеров Ломера – Коттрелла и Хирта, разработаны алгоритм и программа реализации модели, проведены численные эксперименты для описания отклика представительных объёмов меди и латуни, показаны существенные различия в образуемой микроструктуре (плотностях дислокаций и барьеров).

5. **Грибов Д.С.**, Трусов П.В. Дислокационно-ориентированная трёхуровневая модель для описания деформирования поликристаллов: структура, алгоритм реализации, некоторые результаты применения для исследования сложного циклического нагружения// Физическая мезомеханика. – 2022. – Т.25, №4. – С.94-105 (12 стр./6 стр.). (**ВАК**)

Рассмотрено дальнейшее развитие трёхуровневой модели для описания отклика поликристаллов, основное внимание уделено описанию образования источников дислокаций и барьеров на расщеплённых дислокациях. Соискателем разработана подмодель для описания упрочнения за счет взаимодействия дислокаций, разработаны алгоритм и программа реализации подмодели, проведены численные эксперименты на образцах с разной величиной энергии дефекта упаковки, показано существенное различие в величине дополнительного циклического упрочнения, зависящее от сложности процесса нагружения.

6. **Трусов П.В.**, Грибов Д.С. Дислокационно-ориентированная трёхуровневая модель для описания деформирования поликристаллов: структура, алгоритмы реализации, результаты применения для исследования сложного нагружения // Вычислительная механика сплошных сред. – 2022. – Т.15, №3. – С.274-287 (14 стр./7 стр.). (**Scopus**)

Рассмотрены формулировка и приложения модифицированной трёхуровневой модели для описания неупругого деформирования поликристаллических материалов при сложном нагружении. Соискателем разработаны программа реализации и процедуры идентификации модели, проведены численные эксперименты по сложному циклическому нагружению. Основным интересом уделён описанию алгоритма реализации модели. Показано соответствие результатов численных экспериментов данным натурных испытаний.

**Диссертационный совет отмечает**, что на основании выполненных соискателем исследований:

– **предложена** модификация базовой двухуровневой математической модели для описания отклика поликристаллических металлов на внешние воздействия путём введения третьего структурного уровня, на котором описывается эволюция плотностей дефектов;

- **предложена** формулировка законов упрочнения на основе рассмотрения взаимодействия дислокаций и барьеров на системах скольжения;
- **проведена** идентификация и верификация модели на основе расчётов и использованием разработанной трехуровневой математической модели для исследования деформирования образцов из материалов с различными величинами энергии дефекта упаковки (ЭДУ) и количественное сопоставление теоретических результатов с данными натуральных экспериментов;
- **проведены** численные эксперименты и анализ влияния учёта в разработанной математической модели различных физических механизмов (генерации новых дислокаций, аннигиляции дислокаций, образования барьеров на расщеплённых дислокациях) на эволюцию плотностей дефектов разного типа и изменение физико-механических свойств материалов.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

- **разработана** подмодель, дополняющая базовую упруговязкопластическую двухуровневую модель уровнем для описания эволюции плотностей дефектов и упрочнения (зависящего от текущих плотностей дефектов), позволяющая описать отклик материалов с различной величиной ЭДУ;
- **разработаны** алгоритм и программа реализации модифицированной трехуровневой математической модели;
- применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использованы** численные методы моделирования процессов, позволившие получить количественные и качественные результаты исследования процессов неупругого циклического деформирования поликристаллических образцов из материалов с различной величиной энергии дефекта упаковки по программам сложного нагружения;
- с использованием разработанного алгоритма реализации модели **исследованы** процессы эволюции плотностей дефектов в ходе циклического деформирования.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что:

- **разработана** программа для ЭВМ, позволяющая описать сложное (в том числе циклическое) деформирование поликристаллических образцов из материалов с

различной величиной энергии дефекта упаковки (получено свидетельство об интеллектуальной собственности на программу для ЭВМ).

Разработанные модель и программа ее реализации **могут быть использованы** при решении прикладных задач по описанию упрочнения конструкций из материалов с различной ЭДУ, а также для описания других процессов, требующих детального исследования эволюции микроструктуры.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

- обоснованность результатов диссертационной работы определяется применением современных законов физики и механики твердого тела, корректностью математической постановки задачи;
- достоверность подтверждается удовлетворительным соответствием результатов, полученных с использованием предлагаемой модели данным натурных экспериментов.

**Личный вклад соискателя состоит в:** составлении обзора и проведении анализа современного состояния проблемы описания процессов сложного циклического деформирования, существующих математических моделей для исследования данных процессов (макрофеноменологические и дислокационно-ориентированные модели); анализе основных механизмов эволюции плотностей дефектов в ходе неупругого деформирования; построении математической подмодели мезоуровня-2, определении связей между соотношениями и параметрами различных структурно-масштабных уровней модели; формулировке закона упрочнения, позволяющего учесть плотности взаимодействующих дислокаций на системах скольжения и барьеров, образуемых на расщеплённых дислокациях; идентификации модели путём решения задачи оптимизации методом прямого поиска; применении разработанной модели для описания процессов сложного циклического деформирования материалов с различной величиной энергии дефекта упаковки, анализе результатов расчетов (включая их сопоставление с данными натурных экспериментов).

**Диссертационный совет пришёл к выводу** о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и Порядком присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденным приказом ректора ПНИПУ от 09 декабря 2021 г. № 4334-в: в ней содержится формулировка трехуровневой модели для описания сложного неупругого деформирования металлов с различной величиной энергии дефекта упаковки, которая позволяет описать отклик

представительного объема материала, включая эволюцию микроструктуры в процессе деформирования, что имеет важное значение для развития перспективных физически-ориентированных моделей, необходимых для описания неупругого деформирования.

На заседании 20 декабря 2022 года диссертационный совет Д ПНИПУ.01.19 принял решение присудить Грибову Дмитрию Сергеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук (протокол заседания № 11).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 16 докторов наук по специальности защищаемой диссертации, участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за присуждение учёной степени – 16, против присуждения учёной степени – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председательствующий, зам. председателя диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19,

д-р физ.-мат. наук, профессор \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / Ташкинов Анатолий Александрович /  
сб)

Ученый секретарь диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19,

канд. физ.-мат. наук \_\_\_\_\_ /Кротова Елена Львовна/  
сб)

«20» декабря 2022 г. м.п.