

УТВЕРЖДАЮ

Ректор Пермского национального
исследовательского

политехнического университета,

кн. наук, профессор

— А.Б. Петроченков

сентябрь 2025 г.

М.П.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертация «Многоуровневые конститутивные модели неупругого деформирования металлов с описанием измельчения зеренной структуры» по научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук выполнена на кафедре «Математическое моделирование систем и процессов» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

В период подготовки диссертации соискатель Романов Кирилл Андреевич работал в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» на кафедре «Математическое моделирование систем и процессов» в должности ассистента, в лаборатории «Многоуровневое моделирование конструкционных и функциональных материалов» в должности младшего научного сотрудника.

В 2020 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению подготовки 01.03.02 Прикладная математика и информатика (бакалавр), в 2022 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению подготовки 01.04.02 Прикладная математика и информатика (магистр). В настоящий момент является аспирантом 3-го года обучения по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, доцент Швейкин Алексей Игоревич работает проректором по науке и инновациям, ведущим научным сотрудником Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в следующем:

Все представленные в диссертации результаты получены при личном участии автора: постановка задачи (совместно с научным руководителем), построение математических моделей и разработка алгоритмов их численной реализации; вычислительные эксперименты и анализ полученных результатов выполнены автором лично.

2. Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

Для базовой двухуровневой статистической конститутивной модели, разработанной на кафедре «Математического моделирования систем и процессов», проведен детальный анализ устойчивости к возмущениям начальных условий, воздействий и параметрам оператора. С её применением описаны сложные нагружения с изломом траектории деформации. В базовую

двухуровневую статистическую конститутивную модель впервые интегрирована известная в литературе подмодель для приближенного описания процесса измельчения; проведена её модификация, разработан алгоритм реализации. Предложена новая многоуровневая статистическая конститутивная модель для описания напряженно-деформированного состояния и процесса фрагментации зеренной структуры металлов с ГЦК-решеткой при низких гомологических температурах. В модели учитываются дислокационные процессы внутри фрагментов и в их границе, развороты фрагментов, эволюция средних размеров фрагментов и зерен. Сформулированы алгоритмы реализации моделей с использованием вычислительно эффективных численных методов. Созданы программы для ЭВМ, реализующие созданные модели с использованием предложенных алгоритмов. Проведен детальный анализ результатов моделирования деформирования материалов в ходе технологических процессов с углубленным исследованием действующих при фрагментации зерен механизмов деформирования.

3. Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается удовлетворительным соответствием результатов численного моделирования данным натурных экспериментов для простых и сложных нагружений, в том числе – по характеристикам мезо- и микроструктуры материала (текстурам, плотностям дислокаций, углам разориентации фрагментов и средним размерам ячеек, фрагментов, зерен), результатами численной оценки устойчивости и сходимости модели.

4. Практическая и теоретическая значимость диссертационного исследования:

Теоретическую значимость работы составляют формулировки многоуровневых статистических конститутивных моделей для приближенного (через эволюцию среднего размера ячеек) и углубленного комплексного (с учетом дислокационных процессов внутри фрагментов и в их границе, разворотов фрагментов, эволюции средних размеров фрагментов и зерен) описания процесса фрагментации.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования созданных моделей и комплекса программ для описания технологических процессов обработки давлением промышленных металлов, в том числе с применением интенсивных пластических деформаций, что позволит за счет анализа структуры и реализации механизмов деформирования разрабатывать рекомендации по их совершенствованию.

5. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

По теме диссертационной работы Романовым Кириллом Андреевичем опубликовано 26 научных работ, в том числе 7 статей в ведущих журналах, из которых 5 публикаций – в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования *Web of Science* и/или *Scopus*, 2 статьи в ведущих рецензируемых изданиях из перечня ВАК; получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Наиболее значимые работы:

1. Швейкин А.И. Об одном подходе к численной оценке устойчивости многоуровневых конститутивных моделей материалов / А.И. Швейкин, П.В. Трусов, К.А. Романов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14. – № 1. – С. 61–76. (вклад автора – 4 с. / 16 с.) (ВАК).

Переводная версия:

Shveykin A.I. An approach to numerical estimating the stability of multilevel constitutive models / A.I. Shveykin, P.V. Trusov, K.A. Romanov // Computational Continuum Mechanics. – 2021. – V. 14. – No. 1. – P. 61–76 (Scopus).

Введено понятие устойчивости решения, в отличие от традиционного учитывающее параметрическое возмущение оператора и возмущение истории воздействий. Соискателем разработана часть программы вычислительных экспериментов для реализации предлагаемого подхода, включающая рассмотрение разнообразных возмущений начальных условий, истории воздействий, оператора, и анализ норм их отклонений, а также интегральной нормы отклонения возмущенных решений от базовых (получаемых в расчетах с невозмущенными параметрами).

2. Швейкин А.И. Некоторые результаты численной оценки устойчивости двухуровневой конститутивной модели ГЦК-поликристалла / А.И. Швейкин, П.В. Трусов, **К.А. Романов** // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14. – № 2. – С. 127–143. (вклад автора – 4 с. / 17 с.) (**ВАК**).

Переводная версия:

Shveykin A.I. Some results of a numerical estimating of the stability of the FCC metal two-level constitutive model / A.I. Shveykin, P.V. Trusov, K.A. Romanov // Computational Continuum Mechanics. – 2021. – V. 14. – No. 2. – P. 127–143 (**Scopus**).

Соискателем реализована часть функций численного алгоритма, с помощью которых продемонстрировано применение предлагаемого подхода для исследования устойчивости двухуровневой конститутивной модели ГЦК-поликристалла.

3. Shveykin A. Some issues with statistical crystal plasticity models: description of the effects triggered in FCC crystals by loading with strain-path changes / A. Shveykin, **K. Romanov**, P. Trusov // Materials. – 2022. – V. 15. – 6586 (вклад автора – 7 с. / 18 с.) (**Web of Science, Scopus**).

С использованием двухуровневой конститутивной статистической модели неупругого деформирования с известным анизотропным законом упрочнения, идентифицированной для алюминия, описаны возникающие в ходе нагружений с изломом траектории деформации эффекты, в том числе эффект «перекрестного упрочнения». Соискателем с использованием модели получены результаты и проведен их анализ, в ходе которого показана пригодность предложенных конститутивных моделей для описания протекающих процессов на различных масштабных уровнях.

4. **Romanov K.** Advanced statistical crystal plasticity model: description of copper grain structure refinement during equal channel angular pressing / K. Romanov, A. Shveykin, P. Trusov // Metals. – 2023. – V. 13. – 953 (вклад автора – 7 с. / 19 с.) (**Web of Science, Scopus**).

В состав двухуровневой статистической конститутивной модели ГЦК-поликристалла интегрирована модифицированная подмодель ETMB (Y. Estrin, L.S. Toth, A. Molinari, Y. Brechet), приближенно описывающая процесс фрагментации (через эволюцию среднего размера ячеек при деформировании). Соискателем с помощью этой модели проведены вычислительные эксперименты по моделированию процесса изменения зеренной

структуры меди при равноканальном угловом прессовании при комнатной температуре и выполнен анализ полученных результатов.

5. Shveykin A. Stability of crystal plasticity constitutive models: observations in numerical studies and analytical justification / A. Shveykin, P. Trusov, **K. Romanov** // Metals. – 2024. – V. 14. – 947. (вклад автора – 10 с. / 30 с.) (**Web of Science, Scopus**).

Соискателем получены результаты применения методики численного исследования устойчивости многоуровневых моделей к разнообразным возмущениям истории воздействий, начальных условий и параметрическим возмущениям оператора для анализа двухуровневой конститутивной модели поликристаллического ГПУ альфа-титана при различных видах нагружения. Совместно с научным руководителем на основе первого метода Ляпунова аналитически показано, что конститутивные модели на основе вязкопластического соотношения Хатчинсона для описания внутризеренного неупругого деформирования проявляют стремление к устойчивости.

6. **Romanov K.A.** Two-level statistical constitutive model with integrated ETMB model: description of grain structure refinement of AISI 304 steel in cold bending / K.A. Romanov, A.I. Shveykin // Russian Physics Journal. – 2024. – V. 67. – No. 10. – P. 1555–1561 (вклад автора – 4 с. / 7 с.) (**Scopus**).

Соискателем с использованием двухуровневой статистической конститутивной модели с интегрированной ETMB подмоделью описан процесс измельчения зеренной структуры стали AISI 304 при холодной гибке. Проведено моделирование анализируемого технологического процесса с применением коммерческого пакета конечно-элементного анализа, предложен обоснованный выбор из режимов процесса такого, который обеспечивает меньший средний размер зерна.

7. **Романов К.А.** Многоуровневая статистическая конститутивная модель на базе континуальной дислокационной динамики и ее применение для комплексного описания трансформации структуры меди при равноканальном угловом прессовании / К.А. Романов, А.И. Швейкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2025. – № 4. – С. 5–23. (вклад автора – 10 с. / 19 с.) (**БАК, Scopus**).

Предложена новая многоуровневая статистическая конститутивная модель на базе континуальной дислокационной динамики для комплексного описания фрагментации зерен

металлов с ГЦК-решеткой, которая учитывает эволюцию плотности статистически накопленных и геометрически необходимых дислокаций, а также её влияние на изменение средних значений углов разориентации, размеров фрагментов и зерен в поликристалле. Соискателем с использованием многоуровневой конститутивной модели получены результаты изменения напряженно-деформированного состояния и ключевых параметров структуры (размеров зерен, текстуры, углов разориентации и размеров фрагментов, плотностей дислокаций); проведен их анализ.

Получены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

8. Романов К.А., Швейкин А.И., Трусов П.В. Программная реализация модели ЕТМВ: модуль для описания измельчения зерен в двухуровневой статистической конститутивной модели. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024668653 от 9 августа 2024 г. (вклад автора – 34%).

Соискателем разработан программный код, который предназначен для расчета среднего размера ячеек и плотности дислокаций согласно соотношениям модели ЕТМВ и может применяться для приближенного описания измельчения зерен в рамках программных реализаций различных моделей, описывающих напряженно-деформированное состояние материала при деформировании.

9. Романов К.А., Кондратьев Н.С., Швейкин А.И., Трусов П.В. Реализация многоуровневых конститутивных моделей материалов: интеграционный модуль для статистических моделей. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024691996 от 25 декабря 2024 г. (вклад автора – 25%).

Соискателем написан код пакета подпрограмм, используемых для численной реализации основных операций при построении многоуровневых статистических конститутивных моделей.

Прочие работы по теме диссертационного исследования:

10. Швейкин А.И. Численная оценка устойчивости многоуровневых конститутивных моделей / А.И. Швейкин, П.В. Трусов, К.А. Романов // XXII Зимняя школа по механике сплошных сред: Тезисы докладов (Пермь, 22-26 марта 2021 г.) / ПФИЦ УрО РАН. – Пермь, 2021. – С. 350.

11. Романов К.А. Описание измельчения зерен в рамках двухуровневой конститутивной модели ГЦК-поликристалла / К.А. Романов, А.И. Швейкин, П.В. Трусов // Математическое моделирование в естественных науках: Материалы XXX Всероссийской школы-конференции. – Пермь, 2021. – С. 69–71.

12. Романов К.А. Описание эффектов при нагружениях металлов с изломом траектории деформации с использованием двухуровневых конститутивных моделей / К.А. Романов, А.И. Швейкин, П.В. Трусов // XVI Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций»: сб. материалов (Екатеринбург, 16-20 мая 2022 г.). – Екатеринбург, 2022. – С. 143.

13. Швейкин А.И. Исследование устойчивости отклика многоуровневых конститутивных моделей материалов: методика и результаты / А.И. Швейкин, П.В. Трусов, К.А. Романов // XVI Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций»: сб. материалов (Екатеринбург, 16-20 мая 2022 г.). – Екатеринбург, 2022. – С. 170.

14. Романов К.А. Двухуровневая конститутивная модель с интегрированной ЕТМВ подмоделью: некоторые результаты применения для описания измельчения зеренной структуры меди / К.А. Романов, А.И. Швейкин, П.В. Трусов, А.О. Полуянов // Тезисы докладов Международной конференции «Физическая мезомеханика материалов. Физические принципы формирования многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения» (Томск, 5-8 сент. 2022 года). – Томск, 2022. – С. 353–354.

15. Романов К.А. Описание измельчения зеренной структуры при равноканальном угловом прессовании меди с помощью двухуровневой конститутивной модели / К.А. Романов, А.И. Швейкин, П.В. Трусов // Механика деформируемого твердого тела в проектировании конструкций: Программа и тезисы докладов (Пермь, 10-12 окт. 2022 г.) / ПФИЦ УрО РАН. – Пермь, 2022. – С. 90.

16. Романов К.А. Применение двухуровневой конститутивной модели для описания измельчения зеренной структуры меди при равноканальном угловом прессовании / К.А. Романов, А.И. Швейкин, П.В. Трусов // Математическое моделирование в естественных науках: Материалы XXXI Всероссийской школы-конференции. – Пермь, 2022. – С. 268–270.

17. Романов К.А. Модификация двухуровневой конститутивной модели поликристаллической меди для описания измельчения зеренной структуры и результаты ее применения для исследования равноканального углового прессования / К.А. Романов, А.И. Швейкин, П.В. Трусов // XXIII Зимняя школа по механике сплошных сред: Тезисы докладов (Пермь, 13-17 фев. 2023 г.) / ПФИЦ УрО РАН. – Пермь, 2023. – С. 290.

18. Швейкин А.И. О комплексной численной оценке устойчивости многоуровневых конститутивных моделей материалов / А.И. Швейкин, П.В. Трусов, К.А. Романов // XXIII Зимняя школа по механике сплошных сред: Тезисы докладов (Пермь, 13-17 фев. 2023 г.) / ПФИЦ УрО РАН. – Пермь, 2023. – С. 371.

19. Романов К.А. Модифицированная двухуровневая статистическая конститутивная модель: описание измельчения зеренной структуры меди при равноканальном угловом прессовании / К.А. Романов, А.И. Швейкин, П.В. Трусов // Тезисы докладов Международной конференции «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии» (Томск, 11-14 сент. 2023 года). – Томск, 2023. – С. 324–325.

20. Швейкин А.И. Комплексная оценка устойчивости многоуровневых конститутивных моделей материалов / А.И. Швейкин, П.В. Трусов, К.А. Романов // Тезисы докладов Международной конференции «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии» (Томск, 11-14 сент. 2023 года). – Томск, 2023. – С. 345.

21. Романов К.А. Описание процесса измельчения зеренной структуры меди с помощью двухуровневой конститутивной модели / К.А. Романов, А.И. Швейкин, П.В. Трусов // Математическое моделирование в естественных науках: Материалы XXXII Всероссийской конференции. – Пермь, 2023. – С. 280–282.

22. Романов К.А. Многоуровневое моделирование изменения зеренной структуры при технологических процессах обработки металлов / К.А. Романов, А.И. Швейкин, П.В. Трусов // XVIII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций»: сб. материалов (Екатеринбург, 27-31 мая 2024 г.). – Екатеринбург, 2024. – С. 121.

23. Романов К.А. Многоуровневое моделирование измельчения зеренной структуры металлов при технологических процессах обработки / К.А. Романов, А.И. Швейкин, П.В. Трусов // Тезисы докладов Международной конференции «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии» (Томск, 9-12 сент. 2024 года). – Томск, 2024. – С. 292–293.

24. Романов К.А. Модифицированная двухуровневая статистическая конститутивная модель: описание измельчения зерен в технологических процессах обработки металлов и сплавов / К.А. Романов, А.И. Швейкин, П.В. Трусов // Математическое моделирование в естественных науках: Материалы XXXII Всероссийской конференции. – Пермь, 2024. – С. 345–348.

25. Романов К.А. Многоуровневые конститутивные модели: модификация для описания измельчения зерен в технологических процессах обработки металлов / К.А. Романов, А.И. Швейкин, П.В. Трусов // XXIV Зимняя школа по механике сплошных сред: Тезисы докладов (Пермь, 24-28 фев. 2025 г.) / ПФИЦ УрО РАН. – Пермь, 2025. – С. 240.

26. Романов К.А. Применение многоуровневой конститутивной модели для описания измельчения зерен в технологических процессах обработки металлов / К.А. Романов, А.И. Швейкин // Тезисы докладов X Всероссийской

конференции «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике» (Новосибирск, 25-29 авг. 2025 г.). – Новосибирск, 2025. – С. 228.

6. Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите.

Диссертация «Многоуровневые конститутивные модели неупругого деформирования металлов с описанием измельчения зеренной структуры» Романова Кирилла Андреевича соответствует паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ по физико-математическим наукам, а именно пунктам: 1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений; 2. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий; 3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента; 8. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

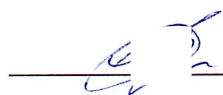
7. Соответствие диссертационной работы требованиям п. 14 «Положения о присуждении ученых степеней».

Диссертация Романова Кирилла Андреевича «Многоуровневые конститутивные модели неупругого деформирования металлов с описанием измельчения зеренной структуры» по научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук отвечает требованиям п. 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям: автор в тексте диссертации корректно ссылается на авторов и источники заимствования материалов, а при использовании результатов научных работ, выполненных

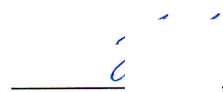
соискателем лично и (или) в соавторстве, отмечает в диссертации это обстоятельство.

Диссертация «Многоуровневые конститутивные модели неупругого деформирования металлов с описанием измельчения зеренной структуры» Романова Кирилла Андреевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Заключение принято на заседании кафедры «Математическое моделирование систем и процессов». Присутствовало на заседании 18 чел. Результаты голосования: «за» – 18 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 2 от «12» сентября 2025 г.



Трусов Петр Валентинович,
и.о. зав. кафедрой «Математическое моделирование систем и процессов» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»



Няшина Наталья Дмитриевна,
секретарь кафедры «Математическое моделирование систем и процессов» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»