

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 Остаповича Кирилла Вадимовича
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук**

Диссертация «Проектирование рационально текстурированных поликристаллических изделий на основе двухуровневой статистической модели упруговязкопластического деформирования» по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите 13 октября 2023 года (протокол заседания №6) 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 Петр Валентинович, заведующий кафедрой «Математическое моделирование систем и процессов» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Официальные оппоненты:

1. Кривилев Михаил Дмитриевич, доктор физико-математических наук (05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), доцент, заведующий лабораторией «Физика конденсированных сред» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Удмуртский государственный университет» Министерства науки и высшего

образования Российской Федерации, г. Ижевск;

2. Маркин Алексей Александрович, доктор физико-математических наук (01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела), профессор, профессор кафедры «Вычислительная механика и математика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, г. Тула.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск. Отзыв ведущей организации утвержден директором, доктором технических наук, профессором Колубаевым Евгением Александровичем, рассмотрен и одобрен на заседании научного семинара лаборатории механики структурно-неоднородных сред ИФМП СО РАН, составлен и подписан заведующим лабораторией механики структурно-неоднородных сред, доктором физико-математических наук Балохоновым Русланом Реговичем.

По теме диссертации соискателем опубликована 31 научная работа, в том числе: 6 статей – в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени; 11 публикаций – в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования (MathSciNet, Scopus, Springer, Web of Science, zbMATH); получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. В тексте диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах. Наиболее значимые публикации по теме диссертации:

1. **Остапович К.В., Трусов П.В.** Об анизотропии упругих материалов: идентификация симметричных свойств // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2016. – Т. 22. – № 1. – С. 69–84. **ВАК**, (вклад автора – 8/16 с.).

Описан предложенный подход к анализу классов симметрии упругих свойств анизотропных материалов. Соискателем сформулированы и для частных случаев решены задачи минимизации оценок невязок симметричных приближений тензора упругих модулей в законе Гука.

2. **Trusov P.V., Ostapovich K.V.** On elastic symmetry identification for polycrystalline materials // *Symmetry*. – 2017. – V. 9. – № 10. – 240. **Scopus, Web of Science** (вклад автора – 14/27 с.).

Приведено усовершенствованное описание подхода для идентификации класса упругой симметрии анизотропного материала. Представлены результаты применения методики к

анализу симметричных свойств поликристаллических агрегатов. Соискателем проработан математический аппарат исследования, сформулирован и доказан ряд теоретических утверждений, проанализированы результаты численных расчетов нагружений модельных поликристаллов с позиции эволюции упругой симметрии.

3. Остапович К.В., Трусов П.В. Исследование кристаллографических текстур при многоуровневом моделировании деформирования поликристаллов с помощью методов кластерного анализа // Вычислительная механика сплошных сред = Computational Continuum Mechanics. – 2019. – Т. 12. – №1. – С. 67–79. **ВАК** (вклад автора – 7/13 с.).

Обсуждается возможность применения аппарата кластерного анализа для описания и исследования кристаллографических текстур по результатам расчетов ориентаций решеток кристаллитов (зерен, субзерен), полученным с использованием многоуровневых упруговязкопластических моделей поликристаллических материалов. В работе описан разработанный соискателем алгоритм послойной кластеризации кристаллографической текстуры, проведен статистический анализ результатов его применения.

4. Остапович К.В., Трусов П.В., Янц А.Ю. Прогнозирование образования кристаллографических текстур при интенсивном неупругом деформировании поликристаллических образцов на основе двухуровневой статистической упруговязкопластической модели // Физическая мезомеханика. – 2020. – Т. 23, № 5. – С. 20-33. **ВАК** (вклад автора – 5/13 с.).

Переводная версия: **Ostapovich K.V., Trusov P.V., and Yants A.Yu.** Prediction of crystallographic texture formation in polycrystalline samples under severe plastic deformation based on a two-level statistical elasto-viscoplastic model // Physical Mesomechanics. – 2021. – Vol. 24, No. 3. – P. 225-236. **Scopus, Web of Science**

Описана разработанная многоуровневая математическая модель для исследования технологических процессов обработки металлов и сплавов методами интенсивной неупругой деформации, основанная на физической теории упруговязкопластичности и позволяющая описывать эволюционирующую структуру, в том числе прогнозировать образование кристаллографических текстур. Соискателем с использованием описанной модели численно получено и проанализировано с точки зрения возникающей текстуры решение задачи о волочении сплошного медного цилиндра.

5. Ostapovich K.V., Trusov P.V. Reduced statistical representation of crystallographic textures based on symmetry-invariant clustering of lattice orientations // Crystals. – 2021. – V.11. – 336. **ВАК, MathSciNet, Scopus, Springer, Web of Science, zbMATH** (вклад автора – 12/23 с.).

Подробно описан аппарат кластеризации, используемый для анализа кристаллографических текстур по выборкам ориентаций и их редуцированного воспроизведения для последующих приложений. Представлены результаты его применения к

исследованию текстур, полученных в численных экспериментах по нагружению кубических поликристаллов. Соискателем выполнена модификация ранее предложенных алгоритмов кластеризации, проведен кластерный и статистический анализ выборок ориентаций, представляющих рассмотренные в работе текстуры, в том числе с оценкой адекватности воспроизведения редуцированными мерами исходных текстур.

6. Ostapovich K.V., Trusov P.V. On using Monte-Carlo simulations for sampling crystallite orientations from given texture data // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2022. – Vol. 43, No. 7. – P. 1962–1975. **BAK, MathSciNet, Scopus, Springer, Web of Science, zbMATH** (вклад автора – 7/14 с.).

Представлен подход типа Монте-Карло для генерации выборок ориентаций кристаллитов по известным текстурным данным. Приведено теоретическое обоснование предложенных алгоритмов с точки зрения слабой вероятностной сходимости. Рассмотрены типичные примеры их практического использования. Соискателем сформулированы и обоснованы два варианта реализации подхода к выборочному восстановлению функции распределения ориентаций на основе случайной частичной оцифровки полюсных фигур, а также проведены расчеты для демонстрационных примеров приложений модифицированного варианта.

7. Trusov P.V., Ostapovich K.V. On implementing boundary conditions for a rate-form quasi-static contact problem with friction: A node-to-facet finite element approach // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2023. – Vol. 10, No. 23. – P. 4474–4488. **BAK, MathSciNet, Scopus, Springer, Web of Science, zbMATH** (вклад автора – 8/16 с.).

Приведена скоростная постановка квазистатической геометрически нелинейной начально-краевой задачи для исследования деформирования твердого тела. Описан алгоритм учета контактных условий при численном решении такой задачи методом конечных элементов. Соискателем получены соотношения, используемые при реализации описанного алгоритма, и предложена его структура.

8. Трусов П.В., Остапович К.В. Программный модуль для послойной кластеризации кристаллографической текстуры по взвешенной выборке ориентаций кристаллитов (ПККТ). – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021662416 от 28.07.2021 (вклад автора – 50%).

Соискателем написан код программного модуля, позволяющего идентифицировать методами кластерного анализа пиковые компоненты кристаллографических текстур в представительных объемах поликристаллов по выборкам ориентаций решеток кристаллитов и соответствующих им объемных долей.

9. Трусов П.В., Остапович К.В. Пакет подпрограмм для генерации выборок ориентаций кристаллических решеток по набору полюсных фигур (crystex). – Свидетельство о

государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023668203 от 24.08.2023(вклад автора – 50%).

Соискателем написан код пакета подпрограмм, используемых в рамках реализации предложенного подхода Монте-Карло для генерации выборок ориентаций кристаллических решеток по набору полюсных фигур.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **сформулирована** в общем виде **задача** функционально-ориентированного проектирования и **предложен метод** ее решения на основе рассмотрения связанных оптимизационных подзадач, отвечающих стадиям деформационной обработки заготовки и функционирования готового изделия;
- для скоростной квазистатической конечно-элементной формулировки начально-краевой задачи деформирования твердого тела **предложен алгоритм** реализации контактных условий;
- в рамках подхода Монте-Карло **предложен алгоритм** генерации по заданным полюсным фигурам выборок ориентаций кристаллических решеток;
- **разработан метод идентификации** текстурных компонент на основе послойной симметрично-инвариантной кластеризации взвешенных выборок ориентаций кристаллических решеток;
- **разработан способ** адаптивного построения пространства текстурных параметров с оценкой их значимости с позиции функционирования проектируемого изделия;
- **решены прикладные задачи**, результаты которых демонстрируют работоспособность созданного аппарата проектирования.

Теоретическая значимость исследования обоснована следующими предложенными в работе подходами:

- задание контактных условий для начально-краевой задачи деформирования твердого тела в скоростной конечно-элементной формулировке, производимое посредством перехода к соответствующим смешанным условиям, согласованным с исходными по узловым силам;
- редуцированное представление текстуры в поликристаллическом агрегате на основе методов кластерного анализа;
- восстановление в дискретной форме меры распределения ориентаций кристаллических решеток по заданным или всюду вычислимым полюсным плотностям с

использованием подхода Монте-Карло в рамках статистической интерпретации фундаментального уравнения текстурного анализа.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что предложенные в работе подходы и алгоритмы, в том числе реализованные и зарегистрированные в виде пакетов прикладных программ для ЭВМ, могут быть применены для решения прикладных задач, связанных с физически обоснованным моделированием технологических процессов интенсивного пластического деформирования поликристаллических металлов и сплавов, требующим анализа текстурообразования – в частности, при рассмотрении проблем типа рационального текстурирования.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- **обоснованность** результатов диссертационной работы определяется корректным применением современного аппарата математики, механики и численных методов при формализации постановок задач;
- **достоверность** подтверждается удовлетворительным соответствием численных решений тестовых задач экспериментальным данным.

Личный вклад соискателя состоит в следующем: обзор литературы по теме диссертационного исследования и связанными с ней вопросами выполнен лично автором; постановка представленных в работе задач осуществлена автором совместно с научным руководителем; алгоритмы решения поставленных задач и реализующие их программы разработаны лично автором; расчеты с использованием разработанных программных средств и анализ полученных в них результатов проведены лично автором; опубликованные статьи по теме диссертационного исследования подготовлены автором (в том числе – с научным руководителем).

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 января 2018 г. № 1-О: в диссертации содержится формулировка задачи установления режимов деформирования поликристаллической заготовки, реализующих в готовом изделии текстуру, рациональную с позиции его дальнейшего функционирования, и вычислительно эффективный подход к ее решению, основанный на применении статистической двухуровневой конститутивной модели

упруговязкопластического деформирования поликристалла, что имеет важное значение для развития методик выработки рекомендаций по совершенствованию технологических процессов получения деталей и элементов конструкций с улучшенными эксплуатационными свойствами.

На заседании 26 декабря 2023 года диссертационный совет Д ПНИПУ.01.19 принял решение присудить Остаповичу Кириллу Вадимовичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (протокол заседания № 7).

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/
(подпись)

Ученый секретарь диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19,
канд. физ.-мат. наук _____ /Кротова Елена Львовна/
(св)

«26» декабря 2023 г.

