

УМИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ПРОЧНОСТИ  
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ**  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
**(ИФПМ СО РАН)**

Академический просп., д. 2/4, г. Томск, 634055  
Тел.: (3822) 49-18-81; факс: (3822) 49-25-76  
E-mail: root@ispms.tomsk.ru; http://www.ispms.ru  
ОКПО 01538612; ОГРН 1027000868971  
ИНН/ КПП 7021000822/ 701701001

Директор ИФПМ

Д.Т.Н. Проф.

Е.А. Колубасев

« 1 » декабря 2023 г.

## **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу Остаповича Кирилла Вадимовича «Проектирование рационально текстурированных поликристаллических изделий на основе двухуровневой статистической модели упруговязкопластического деформирования», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

### **Актуальность темы выполненного исследования**

Значительный прогресс в развитии вычислительных технологий, произошедший за последние несколько десятилетий, открыл перед учеными и инженерами целый ряд принципиально новых возможностей, связанных с возможностью частичной или полной замены дорогостоящих экспериментальных исследований компьютерным экспериментом. Одно из интенсивно развивающихся направлений связано с разработкой программных средств компьютерного конструирования материалов с заданными функциональными свойствами. Реализация таких подходов требует проведения комплексных научных исследований в области разработки математических моделей цифровых двойников материалов, новых алгоритмов и методов численной реализации, пакетов прикладных программ научного и инженерного анализа. Этим определяется актуальность диссертационного исследования Остаповича Кирилла Вадимовича, связанного с проектированием текстурированных поликристаллических изделий с заданными оптимальными свойствами на основе физически-обоснованных моделей упруговязкопластического деформирования.

### **Научная новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

О научной новизне свидетельствуют:

- математическая постановка задачи определения оптимальных технологических параметров текстурирования, обеспечивающих получение поликристаллического материала с заданными механическими характеристиками;
- комплекс алгоритмов и программ численной реализации для моделирования условий на контактных поверхностях материала с инструментом в краевых задачах и генерации выборок ориентаций кристаллитов в соответствии с экспериментально полученными полюсными фигурами;

в краевых задачах и генерации выборок ориентаций кристаллитов в соответствии с экспериментально полученными полюсными фигурами;

- метод построения пространства структурных параметров с оценкой их весовых вкладов в задачах функционально-ориентированного проектирования (ЗФОП);

- результаты решения ЗФОП для определения параметров процесса равноканального углового прессования (РКУП) для получения текстурированного образца меди с оптимальными характеристиками податливости относительно заданного направления.

### **Практическая и теоретическая значимость полученных автором диссертации результатов**

Теоретическая значимость работы заключается в развитии эффективного математического аппарата для решения задач оптимизации и компьютерного конструирования текстурированных металлических изделий с заданными свойствами на основе статистических моделей физической теории пластичности кристаллов, учитывающих механизмы дислокационной пластичности на микроуровне и особенности поликристаллической структуры на мезоуровне.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования разработанных методов, алгоритмов и программных комплексов для решения задач оптимизации параметров механической обработки поликристаллических металлов и сплавов (в частности, методом РКУП) с целью получения изделий с заданной структурой и механическими свойствами.

### **Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений**

Сформулированные в диссертационной работе положения, выводы и рекомендации подтверждаются анализом научной литературы по тематике исследования. Достоверность результатов обеспечена корректной постановкой задач, применением современного математического аппарата и численных методов механики деформированного твердого тела, соответствием результатов тестовых расчетов экспериментальным данным.

### **Оценка содержания диссертации и автореферата**

Диссертационная работа состоит из списка сокращений, введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 169 наименований.

Во *введении* обоснованы актуальность, новизна и практическая значимость работы, изложены цели и задачи исследования, приведены положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и публикации результатов, отмечен личный вклад автора, в реферативной форме изложено содержание разделов диссертации.

В *первой главе* приводится математическая формулировка задачи функционально-ориентированного проектирования текстурированных поликристаллических изделий. Приводится аналитический обзор литературы по теме, на основании которого формулируются задачи диссертационного

исследования и определяются пути их решения. Даются основные определения математического аппарата тензорного и функционального анализа, теории меры и групп, используемого при математической формулировке ЗФОП, и подробные пояснения к используемым далее обозначениям и математическим операциям. С использованием введенных обозначений формулируется ЗФОП в виде двух подзадач, связанных с эволюцией текстуры в процессе изготовления металлического изделия (Т-задача) и поведение текстурированного материала в процессе его последующей эксплуатации (F-задача). Обсуждаются возможные пути их решения с привлечением методов оптимизации, выбор целевых функций и критериев в общем и частных случаях.

*Вторая глава* посвящена формулировке и описанию алгоритмов численной реализации краевой задачи деформирования поликристаллических металлов в процессе интенсивной пластической деформации, приводящей к образованию кристаллографических текстур. Во введении к главе приводится обзор основных классов моделей физической теории пластичности и обоснование дальнейшего использования статистических моделей для реализации поставленных в диссертации задач, обсуждаются особенности решения контактных задач и методы генерации модельных текстур. В основной части главы дается подробная математическая постановка краевой задачи квазистатического деформирования, формулируются соответствующие допущения и гипотезы. Критически важным для адекватного описания текстурообразования представляется использование в качестве определяющих соотношений многоуровневых конститутивных моделей упруговязкопластичности, содержащих внутренние переменные, связанные с эволюцией структуры на разных масштабных уровнях. В качестве численного метода для решения краевой задачи используется метод конечных элементов Галеркина, при описании которого особое внимание уделено постановке и численной реализации граничных условий на контакте деформируемого материала с поверхностью инструмента. Для задания входных данных конечно-элементной модели предложен оригинальный алгоритм воспроизведения начального набора кристаллографических ориентаций по экспериментальным полюсным фигурам на основе подхода Монте-Карло, эффективность которого продемонстрирована на модельных примерах.

В *третьей главе* излагается математический подход к построению пространства текстурных параметров, формирующих критериальные условия ЗФОП и определяющих связи между Т- и F-подзадачами. Решение оптимизационной F-подзадачи предлагается искать в терминах поля меры распределения ориентаций из специального класса, формируемого по результатам предварительных прямых расчетов режимов деформирования заготовки (оптимизируемых в Т-подзадаче) с привлечением аппарата кластерного анализа. В заключении обсуждаются математические аспекты оценки значимости текстурных параметров в контексте реализации связанной Т-подзадачи.

В *четвертой главе* приводится общий алгоритм решения ЗФОП. В качестве примера разработанный аппарат функционально-ориентированного проектирования применяется для определения рациональных параметров

текстурирования медных образцов методом РКУП, обеспечивающих минимальные значения податливости готового изделия в заданном направлении. Рассмотрены ключевые стадии решения ЗФОП, включая определение опорных режимов РКУП путем решения серии прямых краевых задач, построение редуцированного пространства текстурных параметров, определение целевых критериев и ограничений оптимизационных T- и F-подзадач. Показано, что найденное решение обеспечивает податливость на растяжение/сжатие в заданном направлении, близкую к достижимому оптимуму.

В *заключении* приведены основные результаты работы и выводы, подтверждающие достижение поставленной цели исследования.

По работе имеются следующие замечания.

1. В диссертации не приводятся результаты тестовых расчетов, подтверждающих корректность численной реализации МКЭ, что является необходимой процедурой при разработке комплексов программ.
2. Отсутствует информация о параметрах конечно-элементных сеток и типе используемых элементов при моделировании ИПД.
3. Модель деформационного поведения поликристаллов не учитывает возможность образования новых границ кристаллитов в процессе РКУП, что может ощутимо повлиять на механические свойства конечного изделия. Также представляется достаточно идеализированным моделирование РКУП в изотермическом приближении.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки представленной работы. Диссертация выполнена на высоком научном уровне, выстроена логически грамотно, является оригинальной, завершенной научно-квалификационной работой, содержащей новые научные положения, совокупность которых можно характеризовать как научное достижение в области математического моделирования. Основные научные результаты опубликованы в 31 научной работе, включая 5 статей в журналах из перечня изданий, рецензируемых ВАК, 11 публикаций в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных Scopus, Web of Science и др. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Содержание автореферата соответствует диссертации.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы**

Предложенная методика проектирования рационально текстурированных поликристаллических изделий может быть использована для обоснованной настройки существующих процессов обработки металлов давлением под производство различных элементов конструкций с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Разработанные алгоритмы могут быть включены в состав прикладных программ компьютерного моделирования и инженерного анализа реальных технологических операций.

### **Соответствие диссертационной работы паспорту специальности**

Диссертационная работа Остаповича Кирилла Вадимовича соответствует паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные

методы и комплексы программ: пункту № 4 – «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»; пункту № 5 – «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента» и пункту № 9 – «Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий».

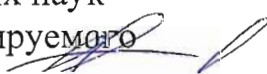
### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**

Диссертационная работа Остаповича К.В. соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертационная работа и отзыв на нее рассмотрены и обсуждены, отзыв одобрен на заседании научного семинара лаборатории механики структурно-неоднородных сред Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (протокол № 36 от 15 ноября 2023 г.).

Отзыв составили:

Заведующий лабораторией механики  
структурно-неоднородных сред ИФПМ СО РАН,  
доктор физико-математических наук  
(01.02.04 – Механика деформируемого  
твердого тела)



— Балохонов Руслан Ревович

Главный научный сотрудник лаборатории механики  
структурно-неоднородных сред ИФПМ СО РАН,  
доктор физико-математических наук  
(01.02.04 – Механика деформируемого  
твердого тела)

— Романова Варвара Александровна

Подписи В.А.Р.  
Ученый секретарь  
к.ф.-м.н

аверяю:

— Н.Ю. Матолыгина

