

## ОТЗЫВ

официального оппонента Кривилева Михаила Дмитриевича на диссертацию 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

Изделия из поликристаллических материалов являются примерами систем, структурирование которых дает возможность получения свойств, наилучшим образом адаптированных под заданные условия нагружения. Вопросы оптимального структурирования таких материалов неразрешимы без привлечения математических моделей, позволяющих описывать взаимосвязь между внутренним строением и наблюдаемыми эффективными характеристиками. Подобные модели, интегрированные в прикладные вычислительные системы для анализа поведения деталей и конструкций, а также расчетов процессов их изготовления, предоставляют перспективный с научно-практической точки зрения инструмент исследования и совершенствования производственных технологий.

В диссертационной работе К.В. Остаповича на базе многоуровневых физически-обоснованных конститутивных моделей развивается подход к решению **актуальных** для современной науки задач, относящихся к созданию поликристаллических изделий (деталей, конструкций) с требуемыми для дальнейшей эксплуатации распределениями материальных физико-механических свойств. Диссертация сосредотачивается на проблеме рационального текстурирования, то есть создания в объеме проектируемого изделия такого распределения ориентаций, при котором определяемые им

рабочие характеристики оказываются наилучшими в конкретных условиях функционирования. Основные достижения диссертанта относятся, в первую очередь, к теоретической проработке аппарата функционально-ориентированного проектирования. Предлагаются оригинальные подходы и новые алгоритмы, представляющие значительный интерес в области математического моделирования и оптимизации процессов интенсивного пластического деформирования (ИПД), особенно с использованием численных методов.

Диссертация состоит из списка сокращений, введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы, содержащего 169 наименований, и приложения, в котором приведены 2 полученных свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Объем работы – 123 страницы.

Во **введении** оценена степень разработанности темы диссертационного исследования, обоснована ее актуальность, поставлены цель и основные задачи, определена научная новизна, приведены сведения о значимости работы с теоретической и практической точек зрения, представлены положения, выносимые на защиту. Содержательно сформулирована «задача функционально-ориентированного проектирования» (ЗФОП), состоящая в определении значений параметров деформирования заготовки из поликристаллического материала, при которых на выходе процесса изготовления получается рационально текстурированное изделие, обладающее требуемыми эксплуатационными характеристиками.

В **первой главе** дан обзор работ, связанных с решением проблем, подобных поставленной ЗФОП. Введен ряд определений, на базе которых математически формализована ее общая структура в виде двух связанных подзадач минимизации. В первой из них производится поиск тем или иным образом параметризованной текстуры на конфигурации проектируемого изделия, доставляющей условный оптимум требуемому критерию его функциональности. Во второй для некоторого технологического процесса

деформирования заготовки определяются параметры режима, реализующего в готовом изделии текстуру, наиболее близкую (в отдельно формализуемом смысле) к полученной из решения первой подзадачи.

**Вторая глава** начинается с обзора представленных в литературе подходов к решению различного рода вопросов, возникающих при физически-ориентированном математическом моделировании методов ИПД с описанием текстурообразования. Обоснован выбор в качестве системы определяющих соотношений материала статистической многоуровневой модели упруговязкопластического деформирования представительного макрообъема поликристалла. Отмечено, что претендующие на физическую адекватность постановки требуют рассмотрения начально-краевых задач с контактными условиями на границе между заготовкой и инструментом. Приведена математическая формулировка такой задачи для изотермического квазистатического приближения, в рамках которого конфигурация инструмента принимается известной в каждый момент времени. Для использованного скоростного вида уравнения равновесия диссертантом построен алгоритм численной реализации на базе метода конечных элементов контактных условий с трением типа Кулона–Зибеля. Отдельное внимание в главе уделено проблеме моделирования деформирования предварительно текстурированного материала, сводящейся к генерации выборок неравномерно распределенных ориентаций кристаллитов в соответствии с некоторым законом, информация о котором предоставлена на полюсных фигурах. С этой целью предложен подход Монте-Карло, основанный на оцифровке изображений таких фигур в случайных точках большой вспомогательной выборки.

**Третья глава** посвящена описанию взаимосвязи оптимизационных подзадач, составляющих ЗФОП. Проведен анализ существующих подходов к редуцированному представлению текстуры в объеме поликристаллического материала, на основе которого сформулирован метод параметризации, наиболее подходящий для уточнения всех целевых критериев и ограничений

с последующим переходом к численной реализации. В общем случае конфигурация изделия дискретизируется конечным числом подобластей, в каждой из которых текстура «раскладывается» на различно интенсифицированные компоненты, определяемые типичными преимущественными ориентациями для исследуемого класса режимов деформирования заготовки. В работе установление такого рода ориентаций предложено производить на основе адаптированного аппарата кластерного анализа. При решении ЗФОП учитываются значимости текстурных параметров для достижения оптимального функционирования изделия. Сопоставление их получаемых и требуемых значений в подзадаче оптимизации режима деформирования осуществляется с использованием в качестве метрики выпуклой квадратичной формы, аппроксимирующей целевой критерий подзадачи поиска наилучшей текстуры.

В **четвертой главе** с опорой на иллюстрирующий пример описана предлагаемая последовательность решения ЗФОП. Промоделирован процесс из двух последовательных стадий равноканального углового прессования, параметризованный углом поворота заготовки непосредственно перед вторым проходом. В качестве целевого критерия подзадачи функционирования изделия выбрана минимизация макроскопической упругой податливости поликристаллического агрегата, представляющего исследуемую область материала, в фиксированном направлении. Реализация описанной последовательности дает в демонстрационном примере значение угла, при котором достигается величина критерия, близкая к возможной оптимальной.

В **заключении** подведены итоги решения задач, поставленных в рамках диссертационного исследования. Описанные полученные результаты свидетельствуют о достижении заявленной цели работы.

По теме диссертации опубликовано 11 работ в изданиях из перечня ВАК и/или входящих в международные базы цитирования. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Результаты диссертационной работы докладывалась и обсуждалась на научных мероприятиях всероссийского и международного уровней.

В качестве интегральной оценки отмечаю следующие сильные стороны диссертационной работы К.В. Остаповича:

1. Соискатель великолепно владеет методами функционального анализа, теории групп и механики твердого деформированного тела. Сочетание трех подходов позволило получить строгое математическое описание нескольких задач из области деформации поликристаллических материалов, исходная постановка которых сложна в силу нелинейности определяющих соотношений и множества кинематических связей.
2. Решения отдельных задач убедительно подтверждены результатами расчетов – например, медоидная кластеризация слоя на рисунке 3.3, которой очень эффективно воспроизводятся исследуемые распределения ориентаций. В упомянутой задаче соискателем предложен надежный и эффективный алгоритм для идентификации текстурных компонент на основе оригинальных подходов к определению меры и невязки.

При ознакомлении с диссертацией возникли следующие **вопросы и замечания**.

1. При исследовании начально-краевых задач предложен новый подход для формализации контактных краевых условий между инструментом и материалом. К сожалению, не приведено примера реализации такой контактной задачи, что необходимо для сравнительной оценки эффективности предложенного метода с другими подходами, известными в литературе. По этой причине оценить преимущество развитого решения сложно.
2. Задача функционально-ориентированного проектирования текстурированных поликристаллических изделий является сильно

нелинейной; дополнительно в изучаемой системе присутствует обратная связь. Для таких систем исследование чувствительности к входным данным является обязательным. В тексте диссертации данный аспект рассматривается кратко, хотя это позволяет оценить область применимости модели и соответствующие диапазоны скоростей деформации.

3. Реализация последовательности решения задачи функционально-ориентированного проектирования (рисунок 4.1) после конкретизации целевого критерия T-подзадачи предполагает переход к решению T-подзадачи. В предложенной схеме решение T-задачи основывается на ранее просчитанных опорных режимах. В результате схема реализации оказывается линейной. Целесообразно предусмотреть в ней корректировку опорных режимов, что сделает алгоритм более универсальным и замкнутым.

Сделанные замечания не снижают научной значимости представленной диссертационной работы и высокого квалификационного уровня диссертанта. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной под руководством доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой математического моделирования систем и процессов Пермского национального исследовательского университета П.В. Трусова. В диссертации получены результаты, позволяющие квалифицировать их как решение актуальной научной задачи, значимой с точки зрения развития подходов в области вычислительного моделирования функциональных и конструкционных материалов (и изделий из них) с поликристаллической структурой. Текст автореферата и диссертации, а также основные публикации, подготовленные автором по теме исследования, полностью отражают суть проделанной работы. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертация удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакциях от 21.04.2016 № 335 и от 12.10.2018 № 1168), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук по специальности 1.2.2 (05.13.18) – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, доцент, доцент, заведующий учебно-научной лабораторией «Физика конденсированных сред», ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», 426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1, тел. раб. 8 (3412) 916-230, эл. почта [mk@udsu.ru](mailto:mk@udsu.ru).

Кривилев Михаил Дмитриевич

Я, Кривилев Михаил Дмитриевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Остаповича Кирилла Вадимовича, и их дальнейшую обработку.

М.Д. Кривилев

Подпись официального оппонента заверяю.

07.12.2023

дата

подпись

Ученый секретарь ФГБОУ ВО «УдГУ»

