

На правах рукописи



**Сергеев Максим Владимирович**

**ПРОЦЕССЫ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ В ПОЛИКРИСТАЛЛАХ  
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Томск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук  
**Балохонов Руслан Ревович**

**Официальные оппоненты:**

**Панин Сергей Викторович**, доктор технических наук, профессор, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория механики полимерных композиционных материалов, заведующий лабораторией

**Лавриков Сергей Владимирович**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, заместитель директора по научной работе

**Зелепугин Сергей Алексеевич**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория математического моделирования физико-химических процессов в гетерогенных системах, ведущий научный сотрудник

Защита состоится 06 декабря 2024 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета «НИ ТГУ.1.1.01», созданного на базе физико-технического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (учебный корпус № 10 ТГУ, аудитория 407).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» [www.tsu.ru](http://www.tsu.ru).

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: <https://dissertations.tsu.ru/PublicApplications/Details/5caa9c94-a26f-4b0d-8517-03f1a0127374>

Автореферат разослан « \_\_\_ » октября 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Усанина Анна Сергеевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Алюминиевые сплавы широко используются в авиации, автомобильной промышленности, судостроении, производстве спортивного и бытового оборудования и многих других областях, где в процессе эксплуатации подвергаются механическим воздействиям в широком диапазоне скоростей нагружения. Для достоверного прогноза прочностных свойств таких материалов необходимы математические модели, учитывающие характеристики поликристаллической структуры и скоростную чувствительность.

Наиболее часто используются сплавы серии 6061 – аналог отечественного АД33, в частности, Al6061T6. Данные сплавы трудно или даже невозможно сваривать без потери функциональных свойств. Одним из перспективных методов соединения металлов является сварка трением с перемешиванием (СТП), демонстрирующая ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами сварки. В материалах со сварными соединениями, полученными трением с перемешиванием, неоднородность поликристаллической структуры выражена наиболее ярко. За счет перемешивания в зонах термомеханического влияния на сторонах отхода, где направление вектора скорости вращения рабочего инструмента совпадает с направлением сварки, и набегания, где этот вектор противоположно направлен, образуется сложная иерархически организованная поликристаллическая структура с зернами различных размеров и формы. Такая морфологическая анизотропия поликристаллической структуры может влиять на степень и характер локализации пластической деформации и разрушения сварных соединений и приводить к преждевременной потере прочности.

В этой связи, исследования, направленные на выявление закономерностей процессов деформации и разрушения алюминиевых сплавов с явным учетом поликристаллической структуры, в том числе при динамическом нагружении являются актуальными.

**Степень разработанности темы исследования.** Работа проводилась в рамках перспективного научного направления – физическая мезомеханика материалов, которое сформировалось в России в ИФПМ СО РАН в конце 20 века и развивается на стыке физики и механики деформируемого твердого тела и материаловедения. Основателем направления является академик В.Е. Панин. В рамках мезомеханики определяющая роль принадлежит границам раздела, вблизи которых при деформировании материалов возникают опасные концентрации напряжений и локализация пластической деформации. Численное моделирование является важным дополнением к экспериментам и позволяет изучать эволюцию НДС внутри объема материала в процессе нагружения, что экспериментально трудно реализуемо, а во многих случаях невозможно осуществлять. Первые работы в России в области моделирования с явным учетом структуры материала были проведены в ИФПМ СО РАН в 1990-е годы под руководством докторов наук П.В. Макарова и С.Г. Псахье континуальными и дискретными методами механики, соответственно. В последующие годы данное направление активно развивалось в

мире, прежде всего, благодаря интенсивному развитию вычислительной техники, постоянно нарастающие возможности которой позволяют проводить численные расчеты с достаточной детализацией особенностей структуры материала, обрабатывать и анализировать полученные результаты с большими массивами данных. Сегодня такие исследования являются передовыми в области вычислительной механики и материаловедения и активно проводятся в ведущих центрах России, Китая, Европы и США. На сегодняшний день отсутствуют исследования, учитывающие одновременное совокупное влияние структуры материала в явном виде, локализации пластической деформации, возможности появления и распространения трещин, скоростной и температурной чувствительности, а также стесненных условий деформирования. В литературе имеются работы, в которых методами конечных элементов и молекулярной динамики исследуется деформирование различных материалов с учётом поликристаллической структуры и температуры [Liu X., 2018; Huang X. et al., 2020; Суг E.D., 2015] либо скорости деформирования [Gao T.J. et al., 2020; Wang Y. et al., 2019; Zhang T., 2015]. Многие работы используют данные EBSD анализа для определения анизотропных механических свойств поликристаллов металлов и сплавов, включая алюминиевые сплавы серии 6061, при динамических термомеханических нагрузках без учета разрушения [Lim H., 2018; Hu P., 2016].

Разработке определяющих уравнений для описания скорости пластических сдвигов посвящено большое количество зарубежных и отечественных работ. Определяющие модели можно условно разделить на макрофеноменологические (Johnson–Cook, Khan–Huang, Khan–Huang–Liang, Bodner–Partom, Fields–Backofen, и др.) и физически обоснованные (Zerilli–Armstrong, Preston–Tonks–Wallace, Rusinek–Klepaczko, Voyiadjis–Almasri и др.). Всесторонний обзор многоуровневых и континуальных моделей, неявно учитывающих зеренную структуру материала, разработанных отечественными и зарубежными исследователями, представлен Трусовым П.В. с соавторами, 2022.

На сегодняшний день сварка трением с перемешиванием интенсивно используется в авиакосмической и автомобильной промышленности благодаря тому, что позволяет формировать неразъемные соединения без плавления. При этом механизмы деформирования и разрушения материала в зонах СТП соединений остаются дискуссионными и требуют дополнительного изучения. Основные исследования проводятся экспериментально и направлены на подбор оптимальных режимов СТП методом простого варьирования параметров сварки [Singh V.P., 2020; Mishra R.S., 2005; Liu H.J., 2013; Aval H.J., 2015; Rao H.M., 2015]. Моделированию посвящено значительно меньше исследований, которые в основном связаны с воспроизводством процесса сварки, изучением термомеханического состояния при движении рабочего инструмента [Shojaeefard M.H. et al., 2014; Su H. et al., 2014, Ji S.D. et al., 2012] и вызванных этим движением изменений микроструктуры [W. Pan et al., 2013; Cho H.H. et al., 2013]. Существует небольшое количество работ, связанных с моделированием механического нагружения СТП соединений, которые, однако, не учитывают

поликристаллическую структуру в явном виде [Shojaeefard M.H. et al., 2014; Saluja R.S., 2012; Citarella R., 2015], но могут неявно использовать многоуровневый подход [Simar A. et al., 2012; D.E. Boouse, 2006].

**Цель диссертационного исследования** – исследовать закономерности процессов деформации и разрушения в поликристаллических структурах алюминиевых сплавов при квазистатических и динамических нагрузках.

Цель работы определила необходимость решения следующих **задач**:

1. Провести аналитический обзор отечественных и зарубежных литературных источников и изучить накопленный опыт в области численных исследований влияния скорости деформации, поликристаллической структуры, внешних граничных условий, температуры на процессы деформирования и разрушения алюминиевых сплавов;

2. Разработать структурно-механическую модель поликристаллов алюминия, учитывающую чувствительность материала к скорости деформирования с учетом деформационного упрочнения, стесненным граничным условиям, температуре, неоднородной поликристаллической структуре в явном виде, а также разрушению;

3. Разработать модель генерации поликристаллических структур в ядре и зоне термомеханического влияния (ЗТМВ);

4. Выполнить численную реализацию структурно-механической модели и провести тестовые расчеты в двумерной и трехмерной постановках;

5. На примере алюминиевого сплава 6061-T6 исследовать закономерности пластического деформирования, процессы зарождения и распространения трещин в поликристаллах в зависимости от скорости и стесненности условий деформирования;

6. Численно исследовать влияние формирующейся на стороне набегания специфической поликристаллической структуры сварного шва при СТП на прочность материала в зоне перемешивания;

7. Изучить влияние структурной неоднородности и особенности межзеренных границ на мезоуровне и границ между зонами сварного соединения на макроуровне на характер и степень растрескивания, а также на особенности локализации деформации в сварных соединениях алюминиевых сплавов на стороне отхода.

**Научная новизна.** Наиболее существенными объектами научной новизны исследования, полученными впервые, являются следующие:

1. Реализована структурно-механическая модель, одновременно учитывающая структуру в явном виде, скорость деформирования и разрушение. В соответствие экспериментам выбраны параметры модели для алюминиевого сплава. Разработаны процедуры генерации поликристаллических структур с характерными особенностями морфологической анизотропии, наблюдаемой экспериментально в зонах сварного соединения на сторонах набегания и отхода.

2. Установлено, что в ходе деформации поликристаллической структуры с вытянутыми зернами в ЗТМВ на стороне отхода наблюдается

динамическая миграция зон максимальной локализации пластической деформации. Поэтому, место зарождения трещины зависит от прочности материала.

3. Показано, что структурный фактор, связанный с упорядоченностью поликристаллической структуры в ЗТМВ на стороне набегания, повышает прочность материала. Данный эффект усиливается при повышении скорости деформирования.

4. Показано, что повышение скорости деформирования приводит к множественному растрескиванию и вызывает изменение места зарождения первичной трещины, так как влияние волновой динамики усиливается и становится преобладающим над фактором структурной неоднородности.

5. Установлено, что стесненные условия ускоряют процесс разрушения материала при низких скоростях нагружения во всем диапазоне деформаций, а при средних и высоких скоростях могут замедлять растрескивание.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Полученные результаты и сделанные выводы относительно влияния скорости деформации, структурной неоднородности и стесненных условий деформирования на разрушение алюминиевых сплавов имеют фундаментальное значение и улучшают понимание процессов деформирования в структурно-неоднородных средах.

Результаты исследований в области упорядоченности структуры и локализации пластической деформации и разрушения алюминиевых сплавов, полученных методом СТП, являются важными для оптимизации процесса СТП и повышения качества соединений.

Результаты могут быть использованы в различных отраслях промышленности, включая автомобильную, судостроительную, аэрокосмическую, энергетическую и другие, для создания более прочных и долговечных конструкций, повышению эффективности производства и уменьшению затрат на материалы и производственные ресурсы.

Разработанные программы и подпрограммы могут быть использованы в ВУЗах и Институтах для обучения студентов старших курсов и аспирантов методам механики структурно-неоднородных материалов.

**Методология и методы исследования.** Численное моделирование проводилось в рамках подходов механики структурно-неоднородных сред с явным учётом структуры материала. Двух- и трехмерные поликристаллические структуры были сгенерированы методом пошагового заполнения, разработанным ранее и модифицированным в данной работе. Для анализа деформации и разрушения поликристаллических алюминиевых сплавов применяется трехмерная структурно-механическая модель. Модель включает термомеханическое релаксационное определяющее уравнение для многомерных течений и деформационный критерий разрушения. Краевые динамические задачи механического нагружения поликристаллических структур решаются численно в двумерной постановке методом конечных разностей (Уилкинс) с помощью собственных разработанных программных кодов, в трехмерной постановке –

методом конечных элементов коммерческого пакета ABAQUS/Explicit с использованием разработанных подпрограмм VUMAT и применением алгоритмов параллельных вычислений.

#### **На защиту выносятся**

1. Структурно-механическая модель алюминиевых сплавов, учитывающая характеристики поликристаллической структуры в явном виде, скорость деформирования и разрушение. Параметры релаксационной модели для сплава Al6061-T6. Процедуры построения поликристаллических структур материала в различных зонах сварного соединения алюминиевого сплава, полученного трением с перемешиванием.

2. Выявленные при численном моделировании закономерности локализации пластической деформации и разрушения в СТП соединениях алюминиевых сплавов, связанные со скоростью деформирования, степенью упорядоченности и морфологией поликристаллической структуры.

3. Результаты численного моделирования локализации деформации и разрушения в поликристаллическом алюминии при различных скоростях деформирования, связанные с характером зарождения и распространением трещин, и стесненностью условий деформирования.

**Достоверность и обоснованность результатов и выводов.** Применение фундаментальных законов механики деформируемых твердых тел и проверенных вычислительных методов обеспечивает достоверность и обоснованность результатов исследования. Результаты не противоречат общепринятым представлениям механики структурно-неоднородных сред, подтверждаются экспериментами и данными, полученными другими авторами, а также проведением расчетов на сеточную сходимость и сравнением численных решений с аналитическими оценками.

**Личный вклад автора.** Автор самостоятельно выполнил поиск и анализ научной литературы по теме исследования, провел расчеты, обработал и проанализировал полученные результаты. Совместно с научным руководителем определил задачи диссертации, сформулировал выводы и основные положения, подготовил научные статьи по теме исследования.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты и положения диссертационного исследования были апробированы на 22 научных конференциях международного и всероссийского уровня, включая Международную конференцию «Физическая мезомеханика» (Томск, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 г.); XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, (Санкт-Петербург, 2023 г.); XXVIII Всероссийскую конференцию по численным методам решения задач теории упругости и пластичности (Красноярск, 2023 г.); XXIII Всероссийскую конференцию молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (УМ-2022) (Новосибирск, 2022 г.); Всероссийскую школу-конференцию молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск–Шерегеш, 2018, 2020, 2021 г.); Всероссийскую школу-

конференцию «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, 2019, 2020 г.); XVII Российскую студенческую конференцию «Физика твердого тела» (Томск, 2020 г.); Advanced Problems in Mechanics (APM 2019): XLVII Int. Conference (Санкт-Петербург, 2018, 2019 г.); VIII молодежную научную конференцию «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (Томск, 2018 г.); X Всероссийскую научную конференцию «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2018 г.); XII Международную конференцию «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2018 г.); Всероссийскую молодежную научную конференцию «Все грани математики и механики» (Томск, 2018 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 5 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 1 статья в зарубежном научном журнале, входящем в Web of Science, 4 статьи в российских научных журналах, переводные версии которых входят в Web of Science), 5 статей в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих Web of Science и / или Scopus.

**Связь работы с научными программами и темами.** Список НИР, в рамках которых проводились исследования, представленные в диссертационной работе, включает следующие проекты и гранты:

- Проект государственного задания для ИФПМ СО РАН FWRW-2021-0002 «Научные основы создания цифровых двойников материалов и сред с иерархической композиционной структурой и программные средства для их виртуального тестирования в условиях статических и динамических термомеханических воздействий».

- Проект государственного задания для ИФПМ СО РАН Ш.23.1.1. «Мезомеханика самоорганизации процессов в мультискейлинге нелинейных иерархических структур и научные основы аддитивных технологий создания многослойных материалов»;

- Проект, поддержанный грантом РФФИ «Мезомеханика границ раздела в соединениях алюминиевых сплавов, полученных сваркой трением с перемешиванием», № 16-01-00469 А, 2018 г.;

- Проект, поддержанный грантом РФФИ «Разработка подхода компьютерного моделирования для оценки влияния технологических параметров на структуру и механические свойства аддитивных материалов», № 18-501-12020, 2018–2020 гг.;

- Проект, поддержанный грантом РФ «Разработка иерархических моделей деформации и разрушения металлокерамических композитных покрытий с учетом эволюции остаточных напряжений», № 18-19-00273, 2018–2020 гг.;

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 88 наименований. Работа изложена на 115 страницах, включая 61 рисунок и 3 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность и степень разработанности темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи работы, описана методологическая база, представлены положения, выносимые на защиту, перечислены новые результаты, раскрыта их научная и практическая ценность и обоснована их достоверность, приведены сведения о личном вкладе и публикациях автора, апробации работы, ее связи с научными программами и темами, а также излагается краткое содержание работы.

**В первой главе** диссертационной работы проведен аналитический обзор современного состояния исследований в области разработки релаксационных определяющих уравнений, динамического деформирования и разрушения материалов, а также методов генерации поликристаллических структуры.

На основе выполненного анализа экспериментальных и теоретических работ можно сделать следующие выводы. На текущий момент времени численные исследования деформирования и разрушения сплавов материалов с учётом скоростной чувствительности и особенностей морфологии структуры, а также анализ НДС и разрушения в зонах СТП является актуальными. Работы, одновременно учитывающие скорость и температуру деформирования, разрушение и в явном виде поликристаллическую структуру алюминиевых сплавов в литературе отсутствуют.

**Вторая глава** диссертации посвящена математической постановке задачи и особенностям численной реализации. Представлена структурно-механическая модель, новизна которой заключается в одновременном учете трех факторов: релаксационного определяющего уравнения для многомерных течений, разработанного на основе физически обоснованной термомеханической модели Немата–Нассера и Гуо, модели разрушения по критической интенсивности пластических деформаций и новых алгоритмов генерации структур материала в сварном соединении, полученным трением с перемешиванием. Разработаны новые алгоритмы генерации структур на основе базового метода пошагового заполнения, позволяющие моделировать особенности морфологии микроструктуры материала, формирующейся в ядре и ЗТМВ сварного соединения, полученного трением с перемешиванием (СТП) (Рисунки 1-2).

Микроструктура, наблюдаемая экспериментально в ЗТМВ (Рисунок 1а), характеризуется наличием колонн (ламелей) зерен, морфология которых имеет тенденцию к прямоугольной форме.

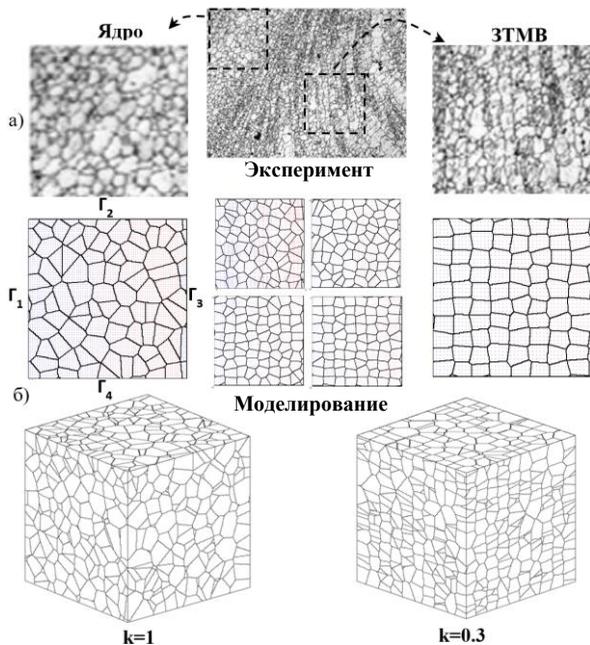


Рисунок 1 – Экспериментальная структура материала СТП соединения на стороне набегания [Dumont M., et al., 2006] (а) и модельные структуры с различной степенью упорядоченности (б)

При генерации структуры с вытянутыми зёрнами, характерной для стороны отхода, рост зёрен осуществлялся по эллиптическому закону. На  $n$ -шаге генерации задавалось приращение объема, окружающего  $i$ -й центр зарождения, через приращения соответствующих полуосей эллипса, центр которого находился в центре  $i$ -й ячейке. Далее путем последовательного перебора для ячеек с нулевым структурным индексом проверялось условие

$$\left(\frac{x'_j - x'_i}{a_i}\right)^2 + \left(\frac{y'_j - y'_i}{b_i}\right)^2 + \left(\frac{z'_j - z'_i}{c_i}\right)^2 \leq 1,$$

где  $X'_j, Y'_j, Z'_j$  и  $X'_i, Y'_i, Z'_i$  – координаты  $j$ -той ячейки с нулевым структурным индексом и  $i$ -го зерна, определенные с учетом ориентации эллипса относительно лабораторной декартовой системы координат.

Общая система уравнений в динамической постановке включает уравнения движения, уравнение неразрывности и соотношения для скоростей деформаций. Замыкается система определяющими уравнениями в форме закона Гука, задающими связь между напряжениями и деформациями

$$\dot{\sigma}_{ij} = -\dot{P}\delta_{ij} + \dot{S}_{ij} = K\dot{\varepsilon}_{kk}\delta_{ij} + 2\mu(\dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{kk}\delta_{ij}/3 - \dot{\varepsilon}_{ij}^p), \quad (1)$$

где  $\sigma_{ij}, S_{ij}, \varepsilon_{ij}, P$  – тензора напряжений, дивергента напряжений, деформаций и давление,  $K$  и  $\mu$  – упругие модули объемного сжатия и сдвига,  $\delta_{ij}$  – символ

Кронекера. Основная задача физики и механики пластичности – определение тензора скорости пластической деформации  $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ .

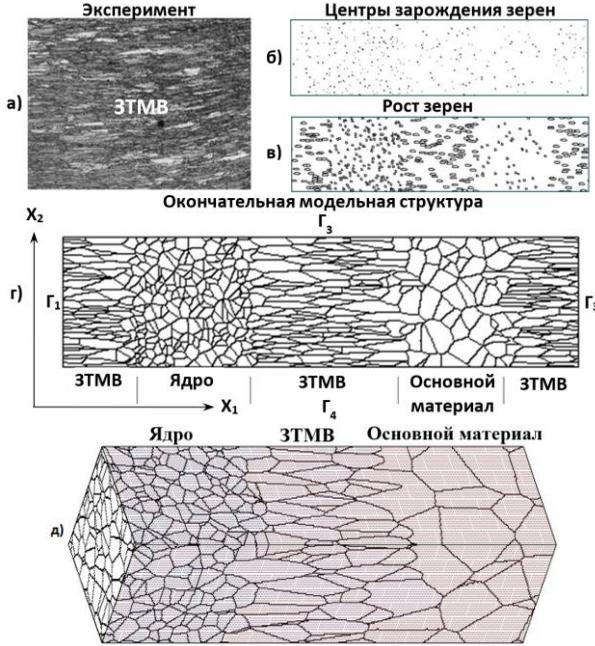


Рисунок 2 – Экспериментальная структура материала в ЗТМВ [Dumont M., et al., 2006] (а) и модельные поликристаллические структуры сварного соединения на стороне отхода (б-д)

В динамической постановке задачи при использовании явных схем, где расчет по времени осуществляется малыми шагами, для корректировки напряженного состояния с учетом поправки на поворот используется производная Яумана, учитывающая скорость изменения напряжений за счет поворота элемента среды [Johnson G.R., 1983]:

$$\dot{S}_{ij} = 2\mu(\dot{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{3}\dot{\epsilon}_{kk}\delta_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^p) - S_{ik}\omega_{kj} + S_{jk}\omega_{ki},$$

где  $\omega_{ij} = \frac{1}{2}(U_{i,j} - U_{j,i})$  – тензор вихря и  $U_i$  – компоненты вектора перемещений, запятая перед нижним индексом – производная по координатам,  $i = 1 \dots 3$ .

В работе рассматривается механическое поведение поликристаллических структур при квазистатическом и динамическом деформировании. Для определения  $\dot{\epsilon}_{ij}^p$  рассмотрим текущее напряжение течения как сумму атермической и термической составляющих.

$$\sigma_{eq} = \sigma_{eq}^a + \sigma_{eq}^T =$$

$$\sigma_s - (\sigma_s - \sigma_0) \exp\left(\frac{\varepsilon_{eq}^p}{\varepsilon_r^p}\right) + \sigma_{cold} \left[ 1 - \left( -\frac{k \left( T_0 + \int_0^{\varepsilon_{eq}^p} \frac{\beta}{\rho C_v} \sigma_{eq} d\varepsilon_{eq} \right) \ln \frac{\varepsilon_{eq}^p}{\varepsilon_r^p}}{G_0} \right)^{1/q} \right]^{1/d}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{eq}$  и  $\varepsilon_{eq}^p$  – интенсивности напряжений и накопленных пластических деформаций.  $\sigma_{eq}^a$  не зависит от скорости деформирования и температуры, обусловлена действующими эффектами и может быть связана с плотностью дислокаций, размером зерен, формированием субструктур и т.д.  $\sigma_{eq}^T$  связана с близкойдействующими барьерами, препятствующими движению дислокаций.

Используя ассоциированный закон пластического течения в виде  $\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{\dot{\varepsilon}_{eq}^p}{\sigma_{eq}} S_{ij}$  и выражая  $\dot{\varepsilon}_{eq}^p$  из (2), получаем

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{S_{ij}}{\sigma_{eq}} \dot{\varepsilon}_r^p \exp\left(-\frac{G_0}{kT} \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_{eq} - \sigma_{eq}^a}{\bar{\sigma}} \right)^d \right]^q\right) \quad (3)$$

где  $\sigma_s$  и  $\sigma_0$  – пределы прочности и текучести при квазистатическом нагружении,  $\varepsilon_r^p$  определяет текущее значение коэффициента деформационного упрочнения.  $\bar{\sigma}$  – напряжение, при котором дислокации преодолевают барьер без термической активации,  $G_0$  – энергия, достаточная для преодоления барьера только за счет термической активации,  $T = T_0 + \int_0^{\varepsilon_{eq}^p} \frac{\beta}{\rho C_v} \sigma_{eq} d\varepsilon_{eq}^p$  – температура,  $T_0$  – начальная температура (температура среды при испытаниях образцов на динамические нагрузки),  $\beta \cong 1$  – по многим оценкам,  $\rho$  – плотность,  $C_v$  – теплоемкость,  $q = 2$  и  $d = 2/3$  – для многих металлов,  $k$  – постоянная Больцмана.

Для описания разрушения используется локальный деформационный критерий максимальной интенсивности пластических деформаций:

$$\varepsilon_{eq}^p = \delta, \quad (4)$$

где  $\delta$  – предельная деформация, после которой локальная область разрушается. Разрушение означает следующее. Если локальная область находится в условиях объемного растяжения, то  $\sigma_{ij}$  становятся равными нулю, а при объемном сжатии область перестает сопротивляться только сдвигу:  $S_{ij} = 0$ .

Расчеты выполнялись для двух- и трехмерных образцов. Модельные микроструктуры подвергались простому одноосному растяжению либо сжатию.

Начальные условия соответствуют ненапряженному состоянию материала

$$\rho|_N = \rho_0, \quad \varepsilon_{ij} = 0, \quad \sigma_{ij} = 0$$

На поверхностях задаются кинематические или силовые граничные условия.

*Растяжение – сжатие* (например, вдоль оси X)

$$\dot{u}_x(x, y, z, t) = -v; \quad \dot{u}_x(x, y, z, t) = v; \quad \sigma_{xz}(x, y, z, t) = 0; \quad \sigma_{xy}(x, y, z, t) = 0$$

*Симметрия* (например, вдоль оси Y):

$$\dot{u}_y(x, y, z, t) = 0; \quad \sigma_{yz}(x, y, z, t) = 0; \quad \sigma_{xy}(x, y, z, t) = 0$$

*Свободные границы*

$$\sigma_{ij}(x, y, z, t) \cdot n_j = 0$$

Здесь  $v$  – скорость,  $n_j$  – нормаль к соответствующим поверхностям.

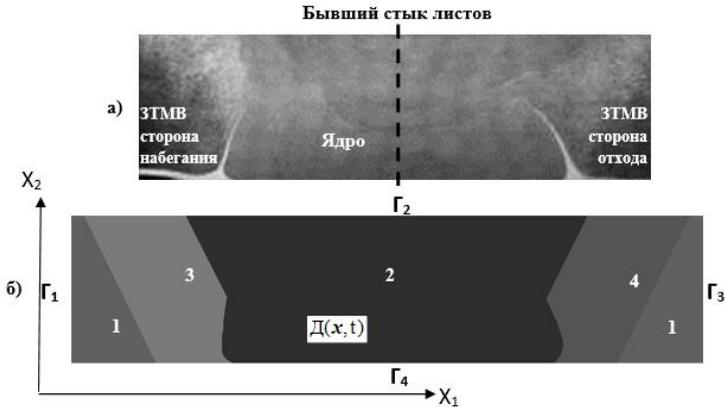


Рисунок 3 – Экспериментальная [Колубаев А.В. и др., 2015] и модельная структуры макроскопических образцов, характерные для СТП соединения алюминиевого сплава

При численном исследовании особенностей пластической деформации и разрушения в СТП сварном шве и околосшовной зоне на стороне отхода явным образом учитывалась экспериментально наблюдаемая структура образца на макроуровне (Рисунок 3а), характеризующаяся наличием различных зон сварного соединения: ядро, основной материал и ЗТМВ. Модельная структура (Рисунок 3б) подвергалась сжатию вдоль направления  $X_2$ , нижняя граница удовлетворяет условиям симметрии, левая и правая свободны от нагрузок.

Поликристаллическая 2D структура (Рисунок 2г) подвергалась одноосному растяжению вдоль оси  $X_1$ , нижняя и верхняя границы свободны от нагрузок. При численном исследовании влияния упорядоченности поликристаллической структуры на деформацию и разрушение граничные условия моделируют одноосное растяжение вдоль оси  $X_1$  (Рисунок 1б), нижняя граница удовлетворяет условиям симметрии, верхняя свободна от нагрузок.

Для трёхмерных модельных структур, расчеты выполнялись для двух типов граничных условий, моделирующих одноосное растяжение образцов в направлении  $X$ . В первом случае оставшиеся 4 поверхности свободны от нагрузок. Второй случай стеснённых граничных условий (СГУ), когда 2 противоположные поверхности свободны от нагрузок, 2 другие удовлетворяют условиям симметрии (Рисунок 4).

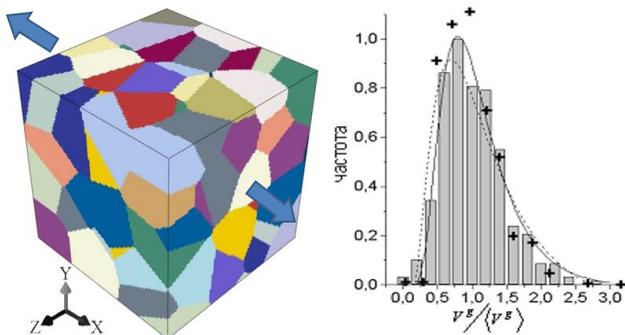


Рисунок 4 – Схема растяжения объёмного образца. Стрелки показывают направление растяжения вдоль оси X. Распределения зерен по размеру в модельной структуре, крестики – экспериментальные данные

При моделировании поликристаллических структур принималось следующее. Алюминий – квазиизотропный материал, коэффициент анизотропии которого составляет около 20 %, и дислокации имеют возможность двигаться сразу по нескольким системам скольжения. Поэтому в работе используется модель изотропного материала, а для описания различия в кристаллографической ориентации отдельных зерен упругие модули варьировались от кристаллита к кристаллиту случайным образом в пределах  $\pm 10\%$  от средних значений. Таким образом, максимальные и минимальные значения модулей отличались на 20 %. Пластические свойства зерен варьировались относительно среднего, наблюдаемого экспериментально для макроскопического образца значения, в зависимости от их размера в диапазоне, показанном на рисунке 5, где предел текучести  $\sigma_0$  в соотношении (2) для отдельного зерна определялся в соответствии с уравнением типа Холла-Петча:

$$\sigma_0 = kd^{-\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

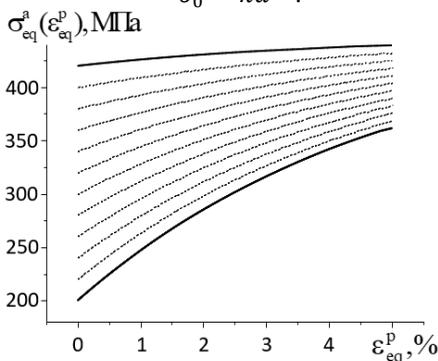


Рисунок 5 – Функции текучести для отдельных зерен различного размера в поликристаллических структурах

В соответствии с экспериментальными данными осуществлена валидация параметров моделей. Значения параметров выбирались путем решения серий прямых задач таким образом, чтобы расчетные зависимости  $\sigma$ - $\varepsilon$  совпадали с экспериментально наблюдаемой механической реакцией алюминиевого сплава Al6061-T6 при различных скоростях и температурах деформирования (Рисунок 6а, б).

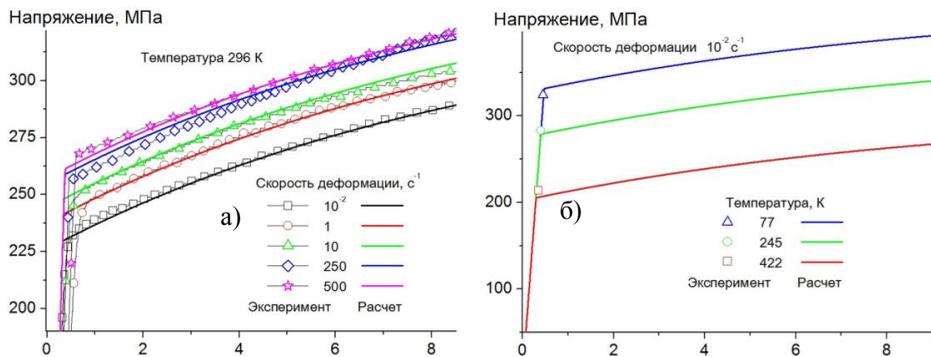


Рисунок 6 – Экспериментальные и расчетные кривые течения алюминиевого сплава Al6061-T6 при разных скоростях деформирования (а) и предсказанные кривые течения при разных температурах испытаний (б)

Таблица 1 – Механические свойства алюминия, используемые в расчетах

$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_s$ , МПа	$\sigma_0$ , МПа	$\varepsilon_r^p$ , %	$K$ , ГПа	$\mu$ , ГПа	$\dot{\varepsilon}_r^p$ , 10 <sup>12</sup> , с <sup>-1</sup>	$\frac{k}{G_0}$ , К <sup>-1</sup>	$\sigma_{cold}$ , МПа	$\psi$ , %
2.7	332	234	9.5	66	26	2.5	$6.1 \cdot 10^{-5}$	280	10

Описаны особенности численной реализации двумерных краевых динамических задач методом конечных разностей. Расчетная область дискретизируется равномерной регулярной сеткой, состоящей из квадратных элементов (Рисунок 7а). Для этой сетки система дифференциальных уравнений механики заменяется системой алгебраических уравнений. Используемая явная условно схема имеет второй порядок точности [Wilkins M.L., 1999] с условием устойчивости Куранта.

Напряжения  $\sigma_{ij}$ ,  $\varepsilon_{ij}$  деформации, и плотность  $\rho$  рассчитываются в центрах расчетных ячеек (см. состояния I, II... на Рисунке 7б), а перемещения  $u_i$  и скорости  $\dot{u}_i$  определяются в узлах (состояния 1, 2... на Рисунке 7б). Соответствующие производные вычисляются из этих значений.

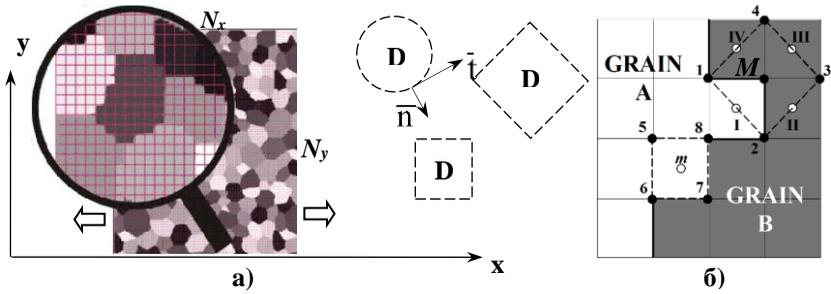


Рисунок 7 – Дискретизация расчетной области (а) и схематическое представление пространственной производной аппроксимации (б)

Исследованиями на сеточную сходимость, а также сравнением аналитического и численного решений, проведена верификация результатов расчетов и показана корректность и достоверность численной модели. Сеточная сходимость (Рисунок 8) для двумерных расчетов доказана на примере неупорядоченной структуры.

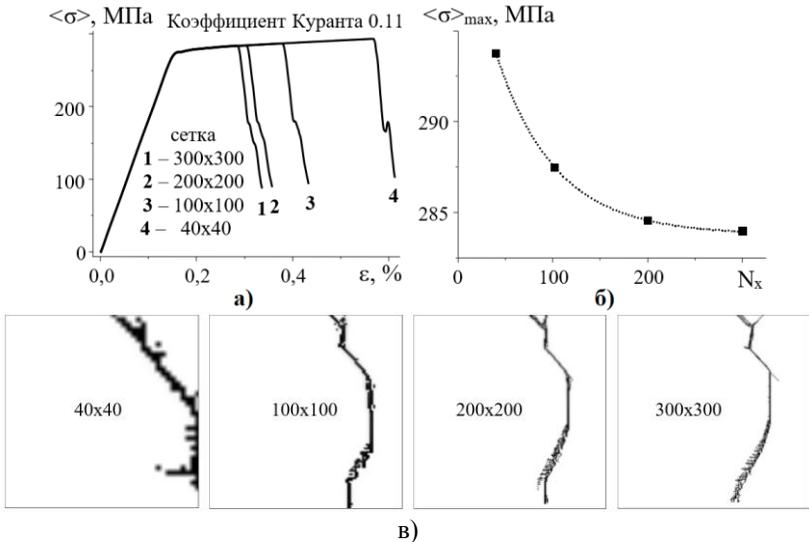


Рисунок 8 – Кривые напряжение-деформация для различных размеров ячеек (а) и осреднённое напряжение на стадии предразрушения (б). Картины разрушения (в) на концах кривых напряжения-деформации (а)

Для исследования сеточной сходимости результатов моделирования трёхмерных поликристаллических структур осуществлена следующая модификация процедуры их генерации. Координаты центров зарождения

запоминаются, и изменяется размер сетки. Закон роста зёрен не изменяется. Таким образом, одна и та же морфология поликристалла аппроксимировалась различным количеством узлов (Рисунок 9 а-в). Показано, что расстояния между кривыми напряжения-деформации нелинейно уменьшаются с измельчением сетки, а распределения трещин качественно подобны (Рисунок 9 г-е).

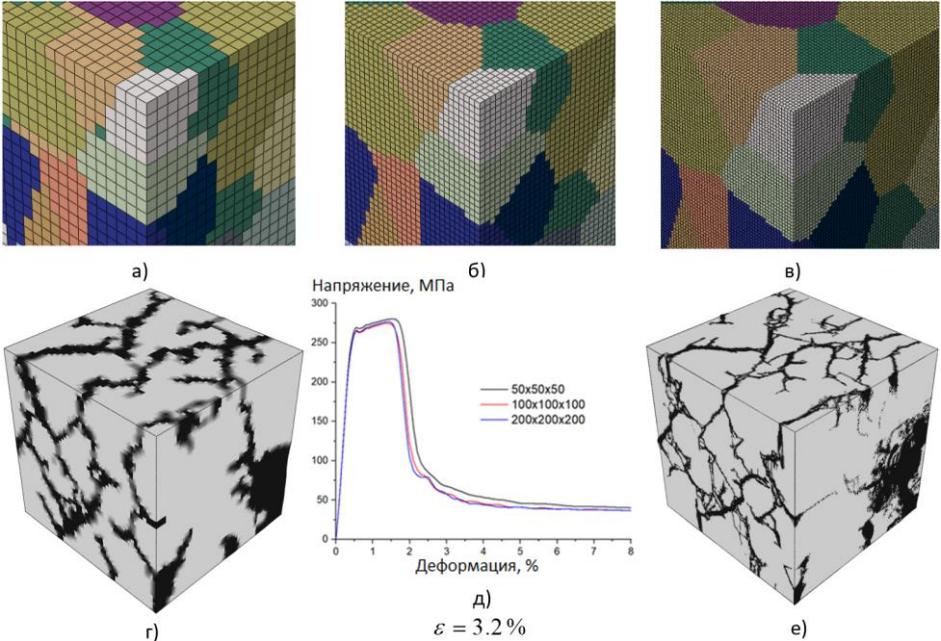


Рисунок 9 – Поликристаллические структуры, аппроксимированные сетками 50×50×50 (а), 100×100×100 (б) и 200×200×200 (в). Распределения трещин для сеток 50×50×50 (г) и 200×200×200 (е), а также соответствующие осредненные кривые течения при растяжении до 3.2 % (д). Скорость деформации 3000 с<sup>-1</sup>

Проверку корректности численной аппроксимации методом конечных разностей проведём на примере сопоставлении теоретической скорости звука в материале с результатами моделирования для поликристаллической структуры в зоне сварного шва на стороне отхода (Рисунок 2г).

$$C_{L\_theor} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} = 0.599 \text{ [см/мкс]} \tag{6}$$

Движение продольной упругой волны показано на картинах распределения интенсивности напряжений (Рисунок 10).

$$C_{L\_calc} = \frac{s}{t} = \frac{0.027(\text{рис.10в}) - 0.012(\text{рис.10б})}{0.05(\text{рис.10в}) - 0.025(\text{рис.10б})} = 0.6 \text{ [см/мкс]} \tag{7}$$

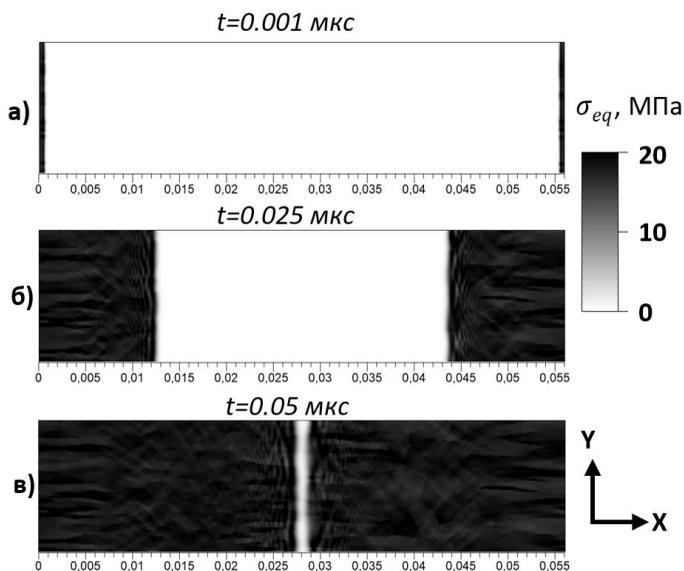


Рисунок 10 – Поля интенсивности напряжений для различных моментов растяжения образца

Таким образом, различия между численным решением и аналитической оценкой составляют малые доли процента, что говорит о корректности используемого численного метода для решения динамических задач и безошибочной его реализации в собственном программном коде.

**В третьей главе** работы исследовано влияние структуры сварного шва на макроуровне, а также поликристаллической структуры на мезоуровне на прочность сварных соединений алюминиевых сплавов, полученных трением с перемешиванием.

На макроуровне с использованием экспериментальных результатов механических испытаний образцов, вырезанных из основного материала и из материала ядра, определены параметры функции упрочнения (Рис.11а) для разных зон сварного шва на сторонах набегания и отхода, и проведены расчеты деформирования и разрушения образца без учета поликристаллической структуры (Рис.3). Показано, что трещина зарождается и распространяется в области границы раздела ЗГМВ с ядром, вызывая ниспадающий участок на интегральной кривой течения (Рис.11б). Аналогичный характер разрушения наблюдается экспериментально.

На мезоуровне исследовано влияние поликристаллической структуры, характерной для сторон отхода и набегания, на прочность сварных соединений. Для структуры материала на стороне отхода с вытянутыми зёрнами в зоне термомеханического влияния наиболее важным результатом является то, что на

разных этапах нагружения максимальный уровень интенсивности пластической деформации наблюдается в различных областях сварного соединения (Рисунки 12, 13а). Перераспределение напряжений и деформаций в процессе нагружения происходит в результате различия деформационного отклика кристаллитов, который в свою очередь определяется криволинейной формой зерен, историей нагружения и местоположением зерна в расчетной области. Поскольку, согласно критерию (4), материал разрушается в области максимальной локализации пластического течения  $\delta$ , а данная область наблюдается в различных местах сварного соединения в процессе нагружения, то при прочих равных условиях место зарождения трещины зависит от прочности материала (Рисунки 13б).

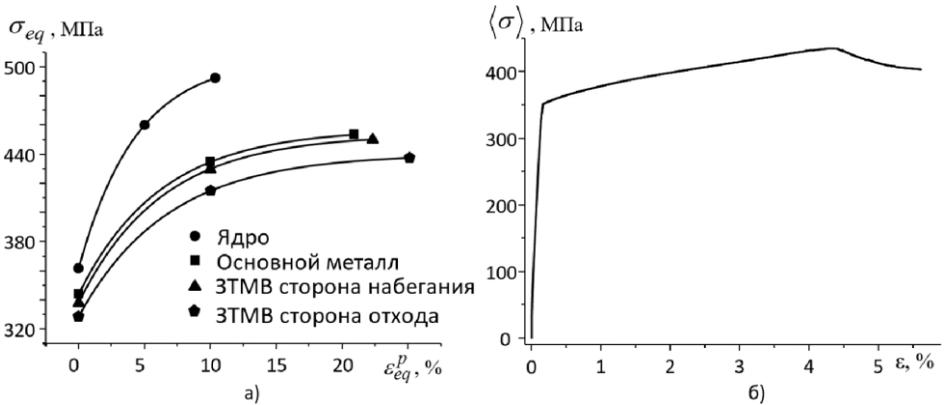


Рисунок 11 – Механические свойства материалов в различных зонах сварного шва (а) и кривая течения при сжатии структуры, показанной на рисунке 3б

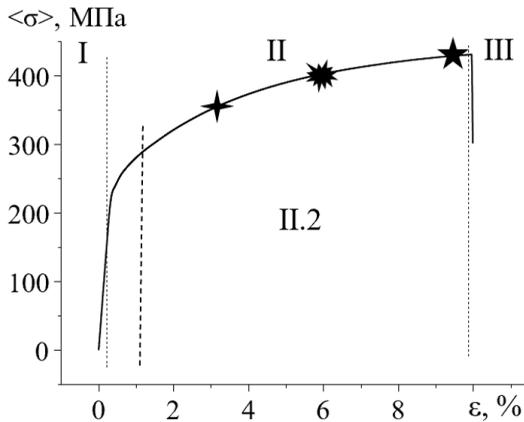


Рисунок 12 – Кривая течения поликристаллической структуры, представленной на рисунке 2г

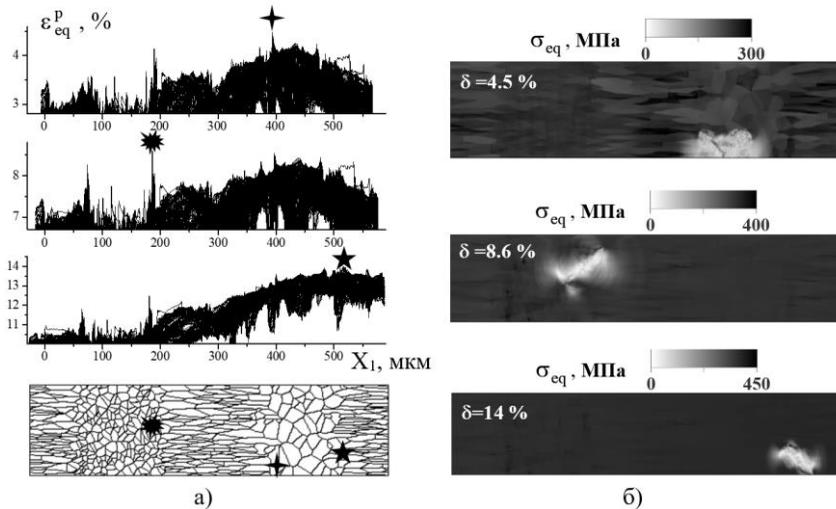


Рисунок 13 – Области максимальной интенсивности пластических деформаций в различные моменты нагружения (а), показанные на рисунке 12, и интенсивность напряжений на начальном этапе распространения трещин в различных зонах СТП-соединения для трех различных расчетов, проведенных с разными значениями предельной деформации  $\delta$  (б)

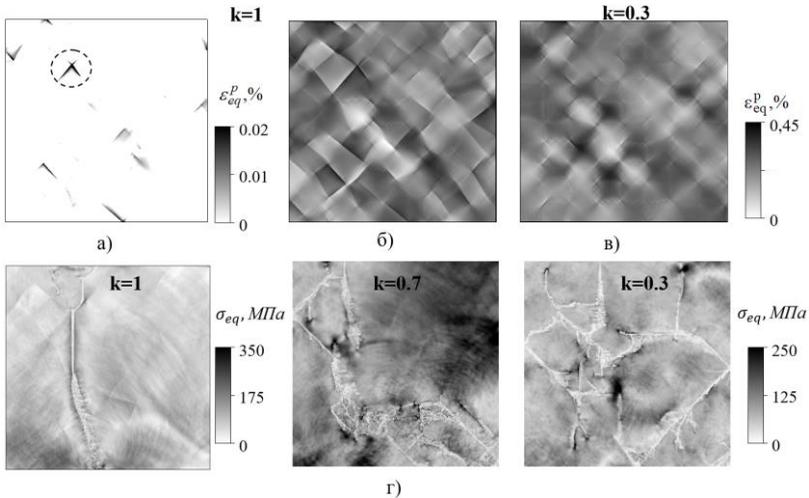


Рисунок 14 – Локализация пластического течения в неупорядоченной структуре вблизи предела текучести (а) и в неупорядоченной (б) и упорядоченной (в) структурах на стадии предразрушения. Характер разрушения при разной степени упорядоченности структур (г)

На стороне набегания сварного соединения наблюдается упорядоченная поликристаллическая структура (Рисунок 1), Показано, что такая морфология оказывает положительное влияние на процессы деформирования и разрушения, уменьшая уровень локализации пластической деформации (Рис. 14 б, в), что приводит к множественному растрескиванию (Рис. 14 г) и более позднему разрушению (Рис. 15 а), чем в образце с неупорядоченной структурой, которая наблюдается в основном материале и ядре. Показано, что такая разница в прочности материалов, обладающих упорядоченной и неупорядоченной структурами  $\Delta\epsilon$ , увеличивается при повышении скорости деформации (Рис. 15б).

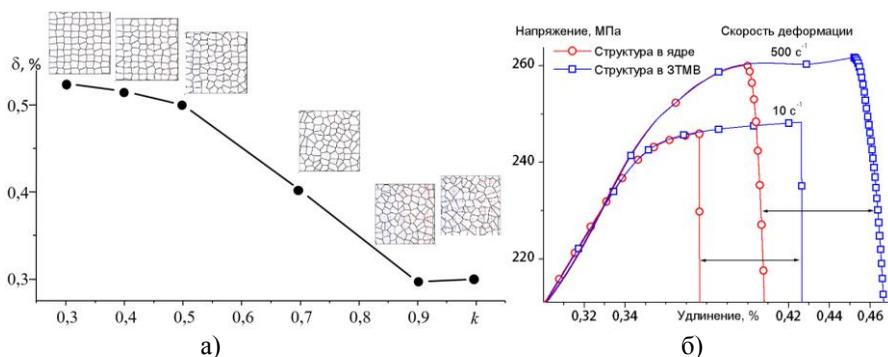


Рисунок 15 –Зависимость прочности от степени упорядоченности структуры (а) и скорости растяжения (б)

**В четвёртой главе** проведен численный анализ влияния скорости и стеснённых условий деформирования на пластическую деформацию и разрушение поликристалла алюминиевого сплава 6061-Т6 при растяжении и сжатии (Рисунки 16-21).

Показано, что поликристаллическая структура приводит к пониженным значениям макроскопического напряжения течения, что связано с ранним зарождением локализованных пластических сдвигов вблизи тройных стыков зерен (Рисунок 16). Вместе с тем вплоть до 1% полной деформации локальные области поликристалла могут оставаться в упругом состоянии по всему объёму исследуемой структуры. Стесненные условия деформирования приводят к формированию вытянутых зон высокой локализации пластической деформации и дополнительному упрочнению (Рисунки 16 и 17). При повышении скорости деформирования увеличивается доля разрушенного материала (Рисунок 18), меняется место зарождение первичной трещины и характер разрушения (Рисунки 19-21 а-г). Показано, что при низких скоростях нагружения (от 10 по 100  $s^{-1}$ ) стесненные условия деформирования играют отрицательную роль, ускоряя процесс разрушения поликристалла (Рисунки 19 д, е). При средних скоростях нагружения (от 100 по 2000  $s^{-1}$ ) существует диапазон деформаций, при котором

возможно снижение скорости распространения трещин в стесненных областях нагруженного материала (Рисунки 20 д, е). При высоких скоростях нагружения (от 3000 с-1), стесненные условия играют отрицательную роль на начальных этапах разрушения, но могут приводить к замедлению растрескивания в областях интенсивного деформирования поликристаллического материала (Рисунки 21 д, е).

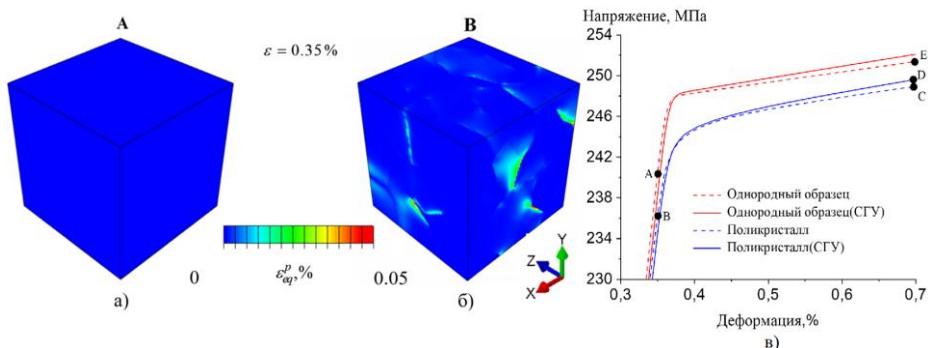


Рисунок 16 – Распределения интенсивностей пластических деформаций в однородном образце (а) и в образце с поликристаллической структурой (б).

Осредненные кривые течения при растяжении однородных и поликристаллических образцов со свободными и закреплёнными в одном из направлений границами (СГУ) (v). Скорость деформации  $10 \text{ с}^{-1}$

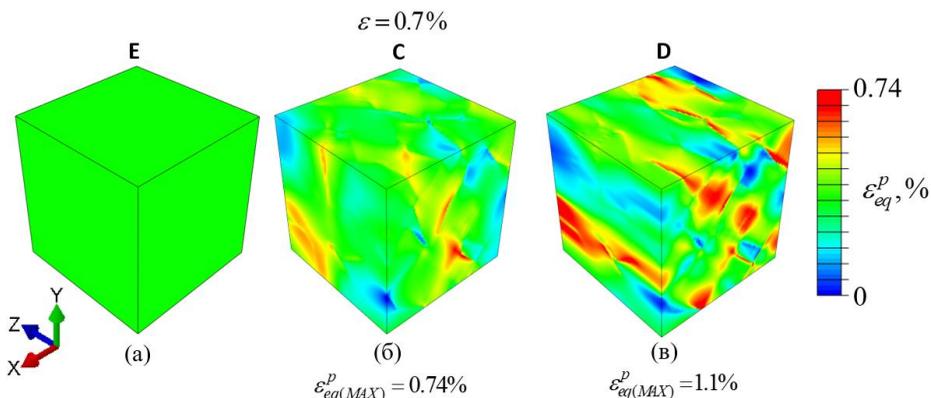


Рисунок 17 – Распределение интенсивности пластической деформации в образце с поликристаллической структурой без дополнительных граничных условий (в) и в стеснённых условиях(г). Скорость деформации  $10 \text{ с}^{-1}$

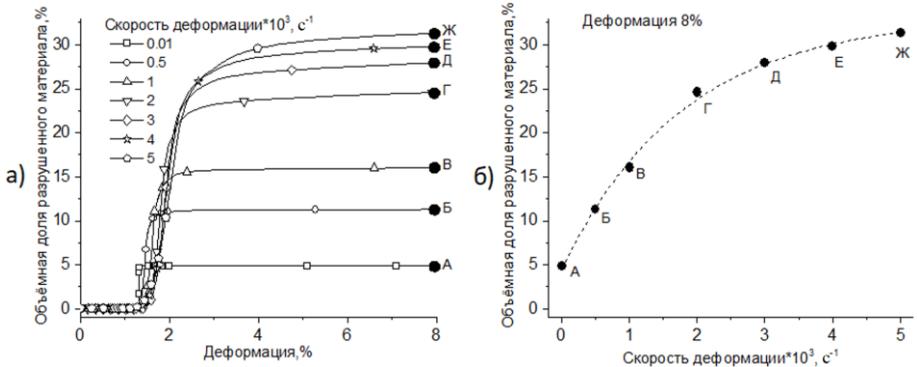


Рисунок 18 – График зависимости объемной доли разрушенного материала от деформации (а) и от скорости деформации (б)

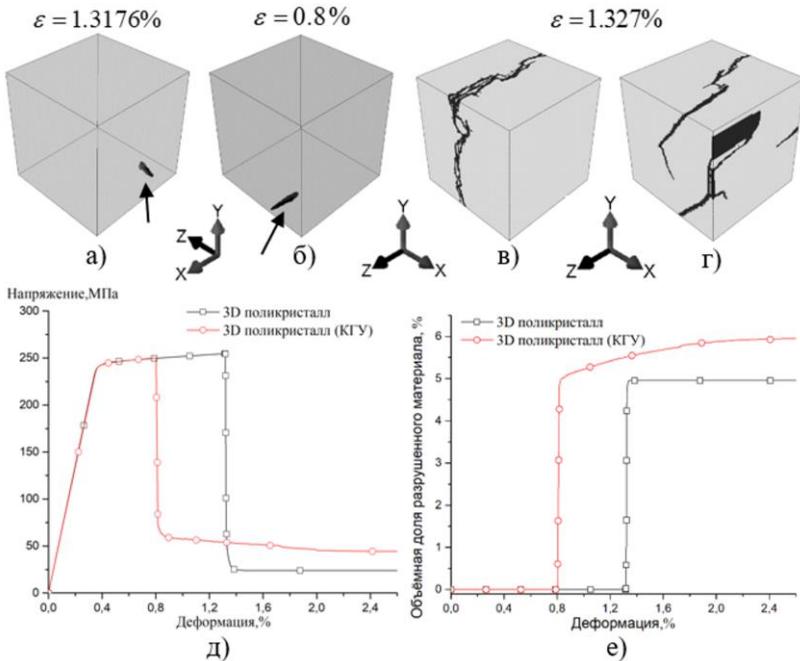


Рисунок 19 – Зарождение первичной трещины для образцов без СГУ (а) и в образце с СГУ (б). Распределение трещин на поверхности образца без (в) и с СГУ(д). График зависимости осреднённого напряжения (в) и объемной доли разрушенного материала (е) от деформации.

Скорость деформации  $10 \text{ c}^{-1}$

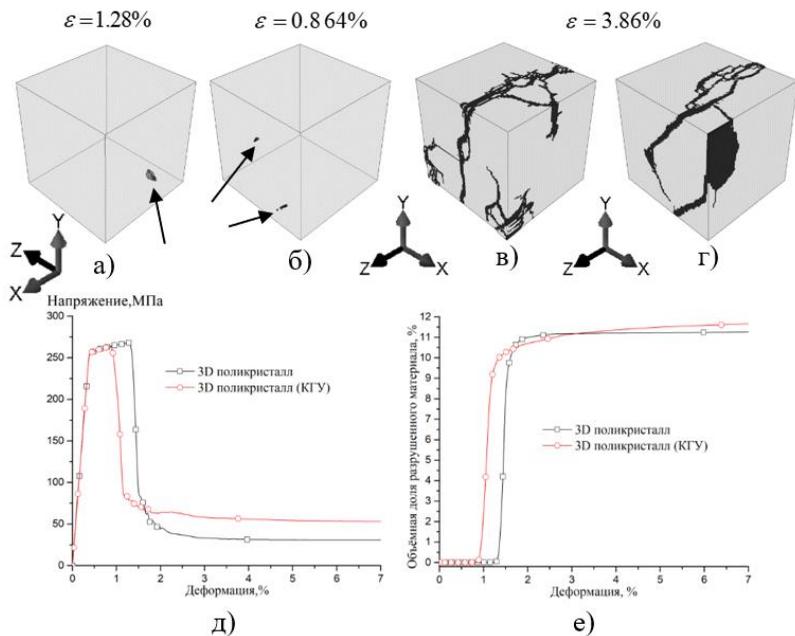


Рисунок 20 – Закономерности разрушения, описанные на рисунке 19. Скорость деформации  $500 \text{ c}^{-1}$

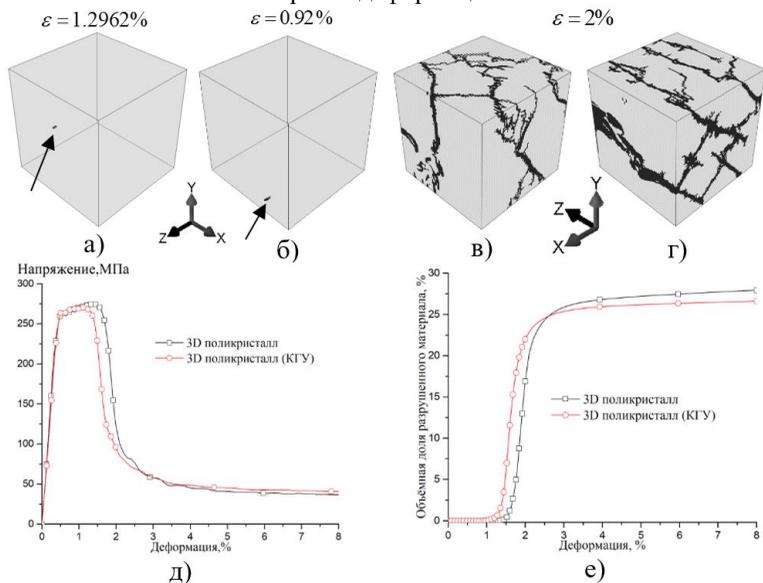


Рисунок 21 – Закономерности разрушения, описанные на рисунке 19. Скорость деформации  $3000 \text{ c}^{-1}$

**В заключении** диссертации приводятся основные результаты и выводы.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе анализа литературных данных, построения численной модели, выполнения экспериментов и численного моделирования и последующего анализа полученных результатов были решены все поставленные задачи и достигнуты цели, поставленные в диссертационной работе.

На основе численного и экспериментального анализа получены следующие результаты и выводы:

Разработана структурно-механическая модель деформирования алюминия, учитывающая поликристаллическую структуру в явном виде, скорость деформации, пластическое течение и разрушение. Выбраны параметры релаксационной модели для сплава Al6061-T6 в соответствии с экспериментальными данными

Разработаны процедуры генерации поликристаллических структур в различных зонах сварного шва с вытянутыми зернами на стороне отхода и различной степенью упорядоченности на стороне набегаания.

Показано, что структурный фактор, связанный с упорядоченностью, повышает прочность материала в ЗТМВ на стороне набегаания.

Установлено, что в сварном соединении на стороне отхода области максимальной локализации пластической деформации изменяют свое местоположение в процессе деформирования. Поэтому место зарождения трещины зависит от прочности материала.

Установлено, что с увеличением скорости деформации меняются места зарождения первичных трещин, увеличивается доля разрушенного материала и реализуется множественное растрескивание поликристаллической структуры.

Показано, что в стесненных условиях деформирования поликристалла, зоны локализации пластического течения вытягиваются перпендикулярно оси растяжения, степень локализации в этих зонах увеличивается, материал упрочняется и на макроскопической кривой течения наблюдается более высокий уровень напряжений по сравнению с образцом без закрепления.

Установлено, что стесненные условия ускоряют процесс разрушения материала при низких скоростях деформации ( $\sim 10 \text{ с}^{-1}$ ) во всем диапазоне деформаций, а при средних ( $\sim 100 \text{ с}^{-1}$ ) и высоких ( $\sim 1000 \text{ с}^{-1}$ ) скоростях могут замедлять процесс развития магистральных трещин.

### **Благодарности**

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю доктору физико-математических наук Р.Р. Балохонову за полезные дискуссии, ценные замечания и помощь в реализации диссертационного исследования. Также автор выражает признательность доктору физико-математических наук В.А. Романовой за ценные замечания и кандидату физико-математических наук Е.С. Емельяновой за всестороннюю помощь и поддержку в период выполнения кандидатской диссертации.

## СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:*

1. Балохонов Р. Р. Моделирование деформации и разрушения поликристаллов алюминиевого сплава в условиях динамического нагружения / Р. Р. Балохонов, **М. В. Сергеев**, В. А. Романова // Физическая мезомеханика. – 2023. – Т. 26, № 1. – С. 31–46. – DOI: 10.55652/1683-805X\_2023\_26\_1\_31. – 0,97 / 0,32 а.л.

*в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:*

Balokhonov R. R. Simulation of Deformation and Fracture in Polycrystalline Aluminum Alloy under Dynamic Loading / R. R. Balokhonov, **M. V. Sergeev**, V. A. Romanova // Physical Mesomechanics. – 2023. – Vol. 26, № 3. – P. 267–281. – DOI: 10.1134/S1029959923030037.

2. Балохонов Р. Р. Закономерности формирования областей объемного растяжения при одноосном и всестороннем сжатии металлокерамических композитов и покрытий / Р. Р. Балохонов, В. А. Романова, Е. А. Шваб, Е. С. Емельянова, О. С. Зиновьева, А. В. Зиновьев, **М. В. Сергеев** // Физическая мезомеханика. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 69–80. – 0,75 / 0,11 а.л.

*в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:*

Balokhonov R. R. Formation of Bulk Tensile Regions in Metal Matrix Composites and Coatings under Uniaxial and Multiaxial Compression / R. R. Balokhonov, E. P. Evtushenko, V. A. Romanova, E. A. Schwab, R. A. Bakeev, E. S. Emelianova, O. S. Zinovyeva, A. V. Zinovyev, **M. V. Sergeev** // Physical Mesomechanics. – 2020. – Vol. 23. – P. 135–146. – DOI: 10.1134/S1029959920020058.

3. Балохонов Р. Р. Влияние поликристаллической структуры на динамическую прочность и характер разрушения материала в различных зонах сварного соединения алюминиевого сплава / Р. Р. Балохонов, В. А. Романова, **М. В. Сергеев**, Е. С. Емельянова, Е. М. Дымнич, А. В. Землянов, М. А. Писарев, Е. П. Евтушенко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2020. – Т. 63, № 5. – С. 10–18. – DOI: 10.17223/00213411/63/5/10. – 0,56 / 0,07 а.л.

*в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:*

Balokhonov R. R. Influence of Polycrystalline Structure on Dynamic Strength and Fracture Character of an Aluminum Alloy in Different Welding Joint Zones / R. R. Balokhonov, V. A. Romanova, **M. V. Sergeev**, E. S. Emelianova, E. M. Dymnich, A. V. Zemlianov, M. A. Pisarev, E. P. Evtushenko // Russian Physics Journal. – 2020. – Vol. 63. – P. 721–730. – DOI: 10.1007/s11182-020-02090-8.

4. Романова В. А. О решении квазистатических задач микро- и мезомеханики в динамической постановке / В. А. Романова, Р. Р. Балохонов, Е. Е. Батухтина, Е. С. Емельянова, **М. В. Сергеев** // Физическая мезомеханика. – 2018. – Т. 21, № 2. – С. 68–79. – 0,67 / 0,13 а.л.

*в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:*

Romanova V. A. On the Solution of Quasi-Static Micro- and Mesomechanical Problems in a Dynamic Formulation / V. A. Romanova, R. R. Balokhonov, E. E. Batukhtina, E. S. Emelianova, **M. V. Sergeev** // Physical Mesomechanics. – 2019. – Vol. 22, № 4. – P. 296–306. – DOI: 10.1134/S1029959919040052.

5. Balokhonov R. A numerical study of the microscale plastic strain localization in friction stir weld zones / R. Balokhonov, V. Romanova, E. Batukhtina, **M. Sergeev**, E. Emelianova // Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 16, is. 1. – P. 77–86. – DOI: 10.22190/FUME180102012B. – 0,59 / 0,12 а.л. (*Web of Science*).

*Статьи в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Web of Science:*

6. **Sergeev M.** Simulation for Fracture Behavior of Polycrystalline Aluminum under Dynamic Loading / M. Sergeev, R. Balokhonov, A. Zemlianov // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2167 : Proceedings of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2019. Tomsk, Russia, October 01–05, 2019. – Article number 020319. – 4 p. – URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2167/1/020319/697577/Simulation-for-fracture-behavior-of> (access date: 21.02.2024). – DOI: 10.1063/1.5132186. – 0,25 / 0,08 а.л. (*Web of Science*).

7. Balokhonov R. R. Strain Rate Effect on the Deformation and Fracture in Different Zones of Friction Stir Welded Aluminum / R. R. Balokhonov, V. A. Romanova, **M. V. Sergeev** // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2167 : Proceedings of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2019. Tomsk, Russia, October 01–05, 2019. – Article number 020030. – 5 p. – URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2167/1/020030/888816/Strain-rate-effect-on-the-deformation-and-fracture> (access date: 21.02.2024). – DOI: 10.1063/1.5131897. – 0,25 / 0,08 а.л. (*Web of Science*).

8. **Sergeev M.** The Influence of Constraint Loading Conditions on Deformation and Fracture of Polycrystals / M. Sergeev, R. Balokhonov, A. Zemlianov // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2167 : Proceedings of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2019. Tomsk, Russia, October 01–05, 2019. – Article number 020320. – 4 p. – URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2167/1/020320/697480/The-influence-of-constraint-loading-conditions-on> (access date: 21.02.2024). – DOI: 10.1063/1.5132187. – 0,25 / 0,08 а.л. (*Web of Science*).

9. **Sergeev M. V.** Numerical Simulation of Deformation and Fracture in Polycrystalline Aluminum at Different Strain Rates / M. V. Sergeev, R. R. Balokhonov, V. A. Romanova, E. S. Emelianova // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2167 : Proceedings of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2019. Tomsk, Russia, October 01–05, 2019. – Article number 020318. – 5 p. – URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2167/1/020318/697573/Numerical-simulation-of->

deformation-and-fracture (access date: 21.02.2024). – DOI: 10.1063/1.5132185. – 0,25 / 0,06 а.п. (*Web of Science*).

10. Balokhonov R. R. Microstructure-Based Numerical Analysis of the Dynamic Deformation of Polycrystalline Aluminum / R. R. Balokhonov, V. A. Romanova, S. Schmauder, **M. V. Sergeev**, E. S. Emelianova, A. V. Zinoviev, O. S. Zinovieva // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2051 : proceedings of the advanced materials with hierarchical structure for new technologies and reliable structures. Tomsk, Russia, October 01–05, 2018. – Article number 020025. – 5 p. – URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2051/1/020025/605606/Microstructure-based-numerical-analysis-of-the> (access date: 21.02.2024). – DOI: 10.1063/1.5083268. – 0,25 / 0,04 а.п. (*Web of Science*).

Издание подготовлено в авторской редакции.  
Отпечатано на участке цифровой печати  
Издательского Дома Томского государственного университета  
Заказ № 7683 от «11» октября 2024 г. Тираж 100 экз.  
г. Томск, Московский тр.8, тел. 53-15-28  
[publish.tsu.ru](http://publish.tsu.ru)