

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.13, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 20 декабря 2019 года публичной защиты диссертации Батухтиной Екатерины Евгеньевны «Микромеханическая модель деформационного поведения поликристаллического алюминия на основе физической теории пластичности» по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Присутствовали 19 из 26 членов диссертационного совета, из них 7 докторов наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела:

- | | |
|--|----------|
| 1. Шрагер Г. Р., доктор физико-математических наук, профессор,
председатель диссертационного совета, | 01.02.05 |
| 2. Христенко Ю. Ф., доктор технических наук, старший научный сотрудник,
заместитель председателя диссертационного совета, | 01.02.04 |
| 3. Пикущак Е. В., кандидат физико-математических наук,
ученый секретарь диссертационного совета, | 01.02.05 |
| 4. Архипов В. А., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.02.05 |
| 5. Биматов В.И., доктор физико-математических наук, доцент, | 01.02.05 |
| 6. Бутов В. Г., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 7. Глазунов А. А., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.02.05 |
| 8. Зелепугин С. А., доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, | 01.02.04 |
| 9. Крайнов А. Ю., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 10. Кульков С. Н., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.02.04 |
| 11. Лапшин О. В., доктор физико-математических наук, | 01.04.14 |
| 12. Люкшин Б. А., доктор технических наук, профессор, | 01.02.04 |
| 13. Макаров П. В., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.02.04 |
| 14. Пономарев С. В., доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, | 01.02.04 |
| 15. Прокофьев В. Г., доктор физико-математических наук, доцент, | 01.04.14 |
| 16. Скрипняк В. А., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.02.04 |
| 17. Тимченко С. В., доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, | 01.02.05 |
| 18. Шрагер Э. Р., доктор физико-математических наук, доцент, | 01.04.14 |
| 19. Якутенко В. А., доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, | 01.02.05 |

Заседание провел председатель диссертационного совета доктор физико-математических наук, профессор Шрагер Геннадий Рафаилович.

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить Е. Е. Батухтиной ученую степень кандидата физико-математических наук.

**Заключение диссертационного совета Д 212.267.13,
созданного на базе федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации,
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук
аттестационное дело № _____**

решение диссертационного совета от 20.12.2019 № 404

О присуждении **Батухтиной Екатерине Евгеньевне**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Микромеханическая модель деформационного поведения поликристаллического алюминия на основе физической теории пластичности»** по специальности **01.02.04** – Механика деформируемого твердого тела принята к защите 14.10.2019 (протокол заседания № 338) диссертационным советом **Д 212.267.13**, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012).

Соискатель **Батухтина Екатерина Евгеньевна**, 1992 года рождения.

В 2015 году соискатель окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

В 2019 году соискатель очно окончил аспирантуру федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

Работает в должности инженера-исследователя лаборатории механики структурно-неоднородных сред федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в лаборатории механики структурно-неоднородных сред Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, **Романова Варвара Александровна**, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория механики структурно-неоднородных сред, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Немирович-Данченко Михаил Михайлович, доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем, профессор

Радченко Андрей Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», Институт кадастра, экономики и инженерных систем в строительстве, директор

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Пермский национальный исследовательский политехнический университет**», г. Пермь, в своем положительном отзыве, подписанном **Трусовым Петром Валентиновичем** (доктор физико-математических наук, профессор, кафедра «Математическое моделирование систем и процессов», заведующий кафедрой), указала, что появление широкого класса новых материалов и технологий их получения, а также методов экспериментального анализа, существенно расширивших представления о процессах деформации и разрушения, предъявляет принципиально новые

требования к моделям, описывающим поведение нагруженных материалов. Поведение неупругодеформируемого материала на макроуровне зависит главным образом от его структуры и реализации механизмов деформирования на низших масштабных уровнях. Вследствие этого существенный интерес представляет разработка многоуровневых моделей материалов, учитывающих влияние на эволюцию напряженно-деформированного состояния процессов разных масштабных и структурных уровней. Тематика диссертационного исследования отвечает современным потребностям механики деформируемого твердого тела и является актуальной. Е. Е. Батухтиной разработана микромеханическая модель алюминиевых сплавов в рамках физической теории пластичности с явным учетом зеренной структуры, новизна которой заключается в совместном учете физических механизмов дислокационной пластичности и реальной геометрии структурных элементов – зерен, что позволяет описать в рамках единого подхода процессы локализации пластической деформации на макро и мезоуровнях и исследовать влияние текстуры и геометрии границ зерен на локальные характеристики напряженно-деформированного состояния; предложен подход к численному моделированию квазистатической деформации поликристаллов в рамках динамической постановки, что позволяет минимизировать вычислительные затраты. Новыми являются результаты численного исследования влияния формы зерен и текстуры на локализацию пластической деформации в мезообъемах сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием. Полученные в диссертационной работе результаты расширяют существующие знания о влиянии внутренней структуры на деформационный отклик алюминиевых сплавов на микро- и мезоуровнях. Практическая значимость работы обусловлена применимостью разработанных моделей для детального исследования и совершенствования технологических процессов механической обработки металлов.

Соискатель имеет 39 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 17 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 6 работ (из них в зарубежных научных журналах, входящих в Web of Science опубликовано 3 работы; в российских научных журналах, переводные версии

которых входят в Web of Science, опубликовано 2 работы), в электронных сборниках материалов конференций, представленных в издании, входящем в Web of Science, опубликовано 7 работ, в сборниках материалов всероссийских (в том числе с международным участием) научной и научно-технической конференций, школ-конференций опубликовано 4 работы. Общий объем публикаций по теме диссертации – 6,97 а.л., авторский вклад – 1,55 а.л.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значительные работы по теме диссертации, опубликованные 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. Balokhonov R. Mesomechanical analysis of the stress-strain localisation in friction stir welds of polycrystalline aluminum alloys / R. Balokhonov, V. Romanova, E. Batukhtina, S. Martynov, A. Zinoviev, O. Zinovieva // *Meccanica*. – 2016. – Vol. 51, is. 2. – P. 319–328. – 0,62 / 0,1 а.л.

2. Balokhonov R. R. A computational study of the microstructural effect on the deformation and fracture of friction stir welded aluminum / R. R. Balokhonov, V. A. Romanova, S. A. Martynov, A. V. Zinoviev, O. S. Zinovieva, E. E. Batukhtina // *Computational Materials Science*. – 2016. – Vol. 116. – P. 2–10. – DOI: 10.1016/j.commatsci.2015.09.045. – 0,56 / 0,09 а.л.

3. Балохонов Р. Р. Особенности локализации деформации и разрушения в сварном соединении алюминиевого сплава на макро- и мезоуровнях / Р. Р. Балохонов, Е. Е. Батухтина, С. А. Мартынов, В. А. Романова // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 502–523. – 1,31 / 0,3 а.л.

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. – 0,68 / 0,14 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, is. 4. – P. 296–306.

На автореферат поступило 5 положительных отзывов. Отзывы представили:

1. **С. В. Смирнов**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., директор Института машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, *с замечанием*: не ясно насколько обосновано использовать модель изотропного деформационного упрочнения (10) на стадии пластической деформации, тогда как на стадии упругой деформации используется закон Гука для анизотропного материала. Как в этом случае стыкуются решения на стадиях упругости и пластичности?
2. **Д. В. Лычагин**, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий кафедрой минералогии и геохимии Национального исследовательского Томского государственного университета, г. Томск, *с замечаниями*: как при одноосном сжатии, так и при сварке трением с перемешиванием имеет место различие величины главных компонент тензора напряжения по величине, а в последнем случае, имеет место значительный градиент их изменения в материале, что не учитывается при моделировании;
- 2) Понятие некристаллографический сдвиг для рассмотрения локализации в масштабе нескольких зерен вряд ли оправдан, т.к. на более низком масштабном уровне он состоит из совокупности кристаллографических сдвигов. Тем более это закладывается при моделировании;
- 3) При обсуждении результатов, полученных на монокристаллах, не обсуждается вопрос об образовании доменов сдвига. Их действие, как областей с активностью определенных систем сдвига, является необходимым для равномерной осадки образца в условиях высокосимметричной оси нагружения.
3. **О. Б. Наймарк**, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий лабораторией физических основ прочности Института механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, и **М. А. Соковиков**, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории физических основ прочности Института механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, *без замечаний*.
4. **В. А. Трофимов**, д-р техн. наук, заведующий лабораторией геодинамических

и газодинамических процессов при освоении угольных и рудных месторождений Института проблем комплексного освоения недр им. Академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, и **И. Е. Шиповский**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамических и газодинамических процессов при освоении угольных и рудных месторождений Института проблем комплексного освоения недр им. Академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, с *замечанием*: в автореферате нет данных о характерных параметрах конечноэлементной сетки, которые обеспечивают приемлемую точность расчета, тогда как такие данные достаточно важны, когда речь идет о моделировании поведения сложных гетерогенных структур. 5. **Н. А. Конева**, д-р физ.-мат. наук, проф., профессор кафедры «Физика, химия и теоретическая механика» Томского государственного архитектурно-строительного университета, и **А. А. Клопотов**, д-р физ.-мат. наук, проф., профессор кафедры «Прикладная механика и материаловедение» Томского государственного архитектурно-строительного университета, с *замечанием*: в автореферате отсутствует сравнение микроструктур, полученных в результате расчета, с экспериментальными данными из литературы по изучению микроструктур из зоны сварного шва при сварке трением с перемешиванием.

В отзывах отмечается, что актуальность темы исследования обусловлена необходимостью разработки проектирования новых иерархических конструкционных и функциональных материалов, учитывающих особенности деформирования материала на разных масштабных уровнях. Е. Е. Батухтиной решены трехмерные краевые задачи упруго-пластического деформирования поликристаллических структур и монокристаллов алюминия, что позволяет рассматривать широкий круг проблем материаловедения; создана работоспособная микромеханическая модель поликристаллического алюминиевого сплава с учетом морфологических особенностей структуры. Особый интерес представляют результаты численного моделирования локализации пластической деформации в поликристаллических структурах с различной формой и кристаллографической ориентацией зерен. Практическая значимость заключается в возможности использования разработанных моделей

и подходов в научных исследованиях и инженерных расчетах для моделирования деформации алюминиевых сплавов с различной структурой и текстурой, характерных для различных видов термомеханической обработки.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **М. М. Немирович-Данченко** является известным специалистом в области численного моделирования деформации и разрушения твердых тел, включая изотропные и анизотропные материалы, пористые среды и геосреды, распространения сейсмических волн, исследования влияния трещиноватости и пористости на эволюцию напряженно-деформированного состояния при динамических нагрузках; **А. В. Радченко** является известным специалистом в области численного исследования фундаментальных закономерностей поведения материалов и конструкций в условиях динамического и ударно-волнового нагружения, включая анизотропные среды; **Пермский национальный исследовательский политехнический университет** известен достижениями в области механики деформируемого твердого тела и многоуровневого моделирования процессов деформации и разрушения в нагруженных материалах.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана структурно-механическая модель поликристаллического алюминия, учитывающая в явном виде морфологические особенности микроструктуры, анизотропию упруго-пластических свойств зерен и физические механизмы дислокационной пластичности с явным учетом систем скольжения;

определены условия численной реализации, обеспечивающие совпадение динамического и статического решений с высокой степенью точности, с целью оптимизации вычислительных затрат при решении квазистатических задач микромеханики;

проведено численное моделирование деформационного поведения монокристаллов алюминия с различной кристаллографической ориентацией в условиях одноосного сжатия с использованием разработанной модели;

исследовано влияние формы зерен и текстуры на характер локализации пластической деформации в микрообъемах алюминиевого сплава, характерных для различных зон сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

разработана микромеханическая модель, обеспечивающая возможность расширения теоретических представлений об эволюции напряженно-деформированного состояния в микрообъемах поликристаллических алюминиевых сплавов;

изложены выводы о влиянии механической и кристаллографической текстур на процессы локализации пластической деформации в микрообъемах материала, способствующие более глубокому пониманию деформационных процессов на микро- и мезоуровнях.

Значение полученных соискателем результатов исследований для практики подтверждается тем, что:

разработаны модели и подходы, имеющие перспективы использования их в научных исследованиях и инженерных расчетах с целью прогноза деформационного поведения алюминиевых сплавов с различной структурой и текстурой с учетом вкладов механизмов пластичности на разных масштабных уровнях.

Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования. Разработанные модели и подходы могут быть использованы для численного анализа деформации алюминиевых сплавов с различной микроструктурой и текстурой в научно-исследовательских организациях Российской академии наук и высших учебных заведениях, таких как Томский государственный архитектурно-строительный университет, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Институт механики Уральского отделения Российской академии наук (г. Ижевск), Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (Пермь), Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Институт проблем сверхпластичности

металлов Российской академии наук (г. Уфа), Уфимский государственный авиационный технический университет, Южный федеральный университет (г. Ростов-на-Дону), Воронежский государственный университет, Новосибирский государственный технический университет, Санкт-Петербургский государственный университет и др., и могут использоваться при подготовке высококвалифицированных специалистов в таких областях, как механика деформируемого твердого тела, физика конденсированного состояния и материаловедение.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

использованы верифицированные численные методы и математические модели, основанные на фундаментальных законах механики;

установлено согласование результатов численного моделирования деформационного процесса с опубликованными экспериментальными данными, аналитическими оценками и результатами численных исследований, полученными другими авторами.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в том, что явный учет поликристаллической структуры, геометрии скольжения и механизмов деформационного и зернограницного упрочнения в рамках единого подхода позволяют описать деформационное поведение поликристаллического алюминия на микро-, мезо- и макроуровнях. Определены условия применения динамической постановки задачи для моделирования квазистатического нагружения упругопластических и вязкопластических материалов с явным учетом границ раздела. Исследовано влияние формы зерен и текстуры на процессы локализации пластической деформации в различных зонах соединений, получаемых при сварке трением с перемешиванием для алюминиевого сплава.

Личный вклад соискателя состоит в: совместной с научным руководителем постановке задач, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту, написании статей по теме диссертации; самостоятельном проведении определяющей части расчетов, представленных в диссертационной работе, обработке и анализе полученных результатов.

Диссертация отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и, в соответствии с пунктом 9 Положения, является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи построения микромеханической модели деформационного поведения поликристаллического алюминия на основе физической теории пластичности кристаллов с явным учетом микроструктуры, имеющей значение для развития механики деформируемого твердого тела.

На заседании 20.12.2019 диссертационный совет принял решение присудить **Батухтиной Е. Е.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 7 докторов наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель

диссертационного совета



Шрагер Геннадий Рафаилович

Ученый секретарь

диссертационного совета

Пикущак Елизавета Владимировна

20.12.2019