

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.036.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ  
ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
(ФИЛИАЛ – ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД)  
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 05.06.2018 № 13

О присуждении *Билалову Дмитрию Альфредовичу*, гражданину России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

**Диссертация** «Механизмы локализации деформации и разрушения в металлах при динамическом нагружении» по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела» принята к защите 02.04.2018, протокол № 4, диссертационным советом Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018 г.

**Соискатель** Билалов Дмитрий Альфредович 1989 года рождения, в 2012 г. окончил ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по специальности «Прикладная математика и информатика», квалификация «Математик, системный программист». В 2016 г. окончил аспирантуру очной формы обучения в Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук по научной специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела. В настоящее время работает ведущим инженером лаборатории физических основ прочности ИМСС УрО РАН. Диссертация выполнена в лаборатории физических основ прочности ИМСС УрО РАН.

**Научный руководитель** – д.ф.-м.н., профессор Наймарк Олег Борисович, заведующий лабораторией физических основ прочности ИМСС УрО РАН.

**Официальные оппоненты:**

1. Змитренко Николай Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий сектором ФГБУН Федеральный исследовательский центр "Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша" РАН" (г. Москва),
2. Дмитриев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор заведующий лабораторией нелинейной физики и механики материалов ФГБУН "Институт проблем сверхпластичности металлов" РАН (г. Уфа),

дали положительные отзывы на диссертацию

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский государственный университет", г. Томск, в своем положительном заключении, составленным Скрипняком Владимиром Альбертовичем, д.ф.-м.н., профессором, заведующим кафедрой механики деформируемого твердого тела; и утвержденном проректором по научной работе ФГАОУ «Национальный исследовательский Томский

государственный университет», д.ф.-м.н. Ивониным И.В, указала, что диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой обоснована роль структурных переходов, обусловленных коллективным поведением дефектов, в процессе локализации пластической деформации; построена математическая модель, позволяющая описывать влияние термического разупрочнения и структурных переходов; развиты методики идентификации параметров по данным оригинальных лабораторных экспериментов. Представленная диссертационная работа «Механизмы локализации деформации и разрушения в металлах при динамическом нагружении» удовлетворяет критериям Положения ВАК РФ «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Биалов Дмитрий Альфредович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твёрдого тела».

**Соискателем опубликовано** 28 научных работ, в том числе 8 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

1. Соковиков М.А., **Биалов Д.А.**, Чудинов В.В., Уваров С.В., Плехов О.А., Терехина А.И., Наймарк О.Б. Неравновесные переходы в ансамблях дефектов при динамической локализации пластической деформации // Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40, Выпуск 23. – С. 82-88.
2. **Биалов Д.А.**, Соковиков М.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Баяндин Ю.В., Терехина А.И., Наймарк О.Б. Исследование локализации пластического сдвига в алюминиевых сплавах при динамическом нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8, №3. – С. 319-328.
3. **Биалов Д.А.**, Соковиков М.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Баяндин Ю.В., Терехина А.И., Наймарк О.Б. Численное моделирование и экспериментальное исследование локализации пластической деформации при динамическом нагружении образцов в условиях близких к чистому сдвигу // Вычислительная механика сплошных сред. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 103-112.
4. Froustey С., Наймарк О.Б., Пантелеев И.А., **Биалов Д.А.**, Петрова А.Н., Ляпунова Е.А. Многомасштабные механизмы структурной релаксации и разрушения в условиях адиабатического сдвига // Физическая мезомеханика. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 33-44.
5. **Биалов Д.А.**, Соковиков М.А., Чудинов В.В. Многомасштабные механизмы локализации пластической деформации при пробивании преград // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – № 5. – С. 43-47.
6. **Bilalov D.**, Sokovikov M., Chudinov V., Oborin V., Terekhina A., Naimark O. Numerical simulation and experimental investigation of strain and damage localization in metals under dynamic loading // AIP Conference Proceedings. – 2014. – Vol. 1623. – P. 67-70.
7. **Bilalov D.**, Sokovikov M., Bayandin Yu., Chudinov V., Oborin V., Naimark O. Numerical simulation and experimental investigation of strain localization in AlMg6 alloy under dynamic loading // AIP Conference Proceedings. – 2015. – Vol. 1683. – 020025.
8. **Bilalov D.A.**, Sokovikov M.A., Bayandin Yu.V., Chudinov V.V., Oborin V.A., Naimark O.B. Numerical simulation of plastic strain localization and failure mode transition in metals under dynamic loading // Structural Integrity Procedia. – 2016. – Vol. 2. – P. 1951-1958.

**На диссертацию и автореферат поступили отзывы:** от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Змитренко Н.В. В отзыве представлена актуальность темы диссертации; проведён анализ наиболее важных результатов; указаны новизна, достоверность, научная и практическая значимость полученных результатов; а так же рекомендации по использованию. Оппонент отмечает следующие замечания по диссертации и автореферату:

- Установленная в работе связь механизмов локализации пластической деформации и формирования областей адиабатического сдвига с автомодельными решениями для деформационного параметра поврежденности – тензора плотности дефектов, требует, как теоретический результат, подтверждения и сопоставления с результатами моделирования, демонстрирующими автомодельные закономерности стадийности развития локализации пластического течения (степенной закон развития масштаба области локализации, постоянство групповой скорости распространения фронта области локализации).
- Развиваемые представления о стадийности разрушения адиабатическим сдвигом связываются в рамках развиваемой общей модели с процессами инициирования автосолитонных решений на стадии локализации пластической деформации и «структур обострения» при формировании зон адиабатического сдвига. Это предполагает необходимость количественного анализа изменений нелинейности термодинамического потенциала (свободной энергии материала с дефектами), описывающих качественные изменения в типах автомодельных решений.

2. Положительный отзыв официального оппонента Дмитриева С.В. В отзыве отмечено, результаты диссертационного исследования вносят значительный вклад в решение проблем, связанных с пониманием механизмов локализации деформации и разрушения пластичных материалов при динамическом нагружении – важного раздела механики деформируемого твердого тела. Оппонент отмечает следующие замечания:

- Усложнение определяющих соотношений необходимо для повышения точности описания отклика деформируемого тела на внешние воздействия. С другой стороны, оно приводит к увеличению числа экспериментальных констант, которые должны быть определены для каждого исследуемого материала и к усложнению трактовки получаемых результатов. Не ставя под сомнение работу, сделанную соискателем, считаю, что следовало бы уделить особое внимание обсуждению конкуренции между повышением адекватности модели и усложнением определяющих соотношений (учёт тензорного характера параметра повреждаемости и учёт температурной зависимости кинетического коэффициента).
- В работе проводится оценка зависимости от температуры различных параметров. В том числе приводится оценка влияния на теплоёмкость, достигающая 18%. Однако, зависимость теплоёмкости от температуры в постановке задач не учитывается. Насколько это правомерно?
- В работе следовало бы уделить большее внимание закономерностям формирования коллективных мод, связь последних с масштабами локализации пластического течения, которые установлены в ходе численного моделирования конкретных экспериментальных постановок.

3. Положительный отзыв ведущей организации. В отзыве отражена актуальность темы диссертации, связь с планами отраслей науки, характеристика содержания работы, научная новизна, обоснованность и достоверность результатов, их значимость для науки и практики, рекомендации по использованию результатов и выводов, оценка полноты опубликования. Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- Диссертанту следовало бы более подробно обсудить вопросы использования динамического критерия прочности материала в решаемых задачах о механическом поведении металлов и сплавов при динамическом нагружении в температурном диапазоне от 25 до 400 °С. При математической формулировке задачи в разделе 2 предложено использовать критерий разрушения  $\sqrt{P:P} \geq p_c$ , мера  $\sqrt{P:P}$  по своему физическому смыслу является деформацией, обусловленной дефектами. Зависимость от температуры критического значения интенсивности тензора плотности микродефектов  $p_c$  не обсуждается и явно не учитывается. Остаётся открытым вопрос о правомерности использования вместо критерия прочности соотношений (2.17) и (2.24), определяющих влияние температуры на вязкость сплошных материалов.
- Диссертанту следовало бы обосновать границы применимости разработанной модели для описания процесса локализации пластической деформации и разрушения при динамическом нагружении для разных изомеханических групп металлических материалов. Принятая диссертантом гипотеза о несущественном изменении механических и теплофизических параметров материала (массовой плотности, модуля упругости и теплоёмкости), в частности, алюминиевых сплавов в диапазоне температур от 25 до 400 °С требует обоснования.
- В диссертации представлено сопоставление полученных теоретических результатов с экспериментальными данными. Следовало бы указывать конкретный источник экспериментальных данных. Информация об источнике экспериментальных данных и интервалах погрешностей отсутствует для результатов, представленных на рисунках 3.15, 3.18, 3.24, 3.27, 3.30, а также в таблице 3.2

**На автореферат поступило 8 отзывов:**

1. Положительный отзыв от Разоренова С.В., д.ф.-м.н., профессора, заведующего лабораторией Реологических свойств конденсированных сред при импульсных воздействиях, отдела экстремальных состояний вещества ФГБУН «Институт проблем химической физики Российской академии наук», г. Черноголовка (без замечаний);
2. Положительный отзыв от Брагова А.М., д.т.н., профессора, заведующего лабораторией Динамических испытаний материалов ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород (1 замечание);
3. Положительный отзыв от Макарова П.В., д.ф.-м.н., профессора, заведующего лабораторией Механики структурно-неоднородных сред ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук» и Романовой В.А., д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника лаборатории Механики структурно-неоднородных сред ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук», г. Томск (без

замечаний);

4. Положительный отзыв от Панина С.В., д.т.н., профессора, заведующего лабораторией Механики полимерных композиционных материалов, зам. директора ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук», г. Томск (3 замечания);
5. Положительный отзыв от Бродовой И.Г., д.т.н., профессора, главного научного сотрудника лаборатории цветных металлов ФГБУН «Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук», г. Екатеринбург (2 замечания);
6. Положительный отзыв от Майера А.Е., д.ф.-м.н., заведующего кафедрой Общей и прикладной физики ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», г. Челябинск (4 замечания);
7. Положительный отзыв от Кащенко М.П., д.ф.-м.н., профессора, заведующего кафедрой Физики ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург (без замечаний);
8. Положительный отзыв от Зуева Л.Б., д.ф.-м.н., профессора, заведующего лабораторией Физики прочности ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук» и Баранниковой С.А., д.ф.-м.н., доцента, ведущего научного сотрудника лаборатории Физики прочности ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук», г. Томск (без замечаний).

**В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:**

- Автором проводится сравнение результатов моделирования пробития пластин с экспериментом лишь по величинам температур. Интересно было бы оценить работоспособность предложенной модели на примере сравнения запреградной скорости ударника, форме пластины-мишени после соударения, форме кратера или чему-то подобному.
- В работе проведено комплексное исследование поведения материалов АМг6, А6061 и стали 25ХНЗМФС при динамическом нагружении, однако из текста автореферата остаётся не до конца ясным, почему были выбраны именно эти материалы и почему для них актуальны исследования, связанные с динамическим нагружением.
- Использованную в работе формулировку «численная реализация модели в виде программы в пакете Abaqus» следует считать не совсем удачной.
- Автором не даны пояснения либо трактовка причин заметного расхождения результатов расчётов и экспериментальных данных на графиках, представленных на рис. 4а и 7. Кроме того, на рис. 7 для экспериментальных результатов наблюдается выраженный минимум (экстремум) температуры. Автор, к сожалению, оставил данный факт без комментария.
- Из автореферата не ясно, проводилась ли количественная оценка доли термического разупрочнения от динамической прочности алюминиевых сплавов, что, безусловно, должно представлять практический интерес.
- Представленные на рис. 6б результаты недостаточны для достоверной информации о соответствии теоретических и экспериментальных данных для сплава А6061.

- В таблице 2 тепловое разупрочнение охарактеризовано численно, можно ли численно охарактеризовать вклад дефектов в разупрочнение?
- Первое уравнение на стр. 7 – по смыслу интеграл должен быть по фазовому объёму распределения, какой объём понимается под  $V$ ?
- В тексте (стр. 15, 16) даётся ссылка на критерий разрушения как (11), должно быть (14).
- На рис. 2-5, 7 не указаны условия деформации образцов (пробития преград).

В отзывах отмечено, что диссертация является законченным исследованием и представляет научный интерес, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых обоснована, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

**официальные оппоненты** являются одними из ведущих специалистов в области численного моделирования и физики пластичности, имеют большое число публикации с результатами исследований поведения материалов при динамическом нагружении; обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

**ведущая организация** ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Томский государственный университет" хорошо известна своими достижениями в области механики деформируемого твердого тела, на базе физико-технического факультета активно ведутся теоретические и экспериментальные исследования деформационного поведения материалов, в том числе – при динамическом нагружении.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**предложена** и обоснована модификация модели деформируемого твердого тела, учитывающая эффекты термического разупрочнения и описывающая связь структурных переходов, обусловленных дефектами, с релаксационными свойствами материалов при динамическом нагружении;

в кинетическое соотношение для скорости пластической деформации для учёта термического разупрочнения **введена** зависимость от температуры;

**разработана** и апробирована методика определения характерной температуры, используемой в соотношениях, для учета термического разупрочнения;

**доказана** определяющая роль структурных переходов, обусловленных коллективным поведением дефектов, в инициировании процесса локализации пластической деформации при динамическом нагружении при скоростях деформации менее  $10^4 \text{ с}^{-1}$  (на примере сплава АМг6);

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

– на основе соотношений, определяющих поведение среды с дефектами (микросдвигами), построена математическая модель для описания деформационного поведения металлов и сплавов при динамическом нагружении;

– идентифицированы и верифицированы параметры модели для ряда материалов;

– представления о механизмах локализации пластической деформации построены на

основе анализа напряжённо-деформированного состояния лабораторных образцов специальной формы (П-образов), сопоставлены результаты вычислительного и физического эксперимента для верификации методики определения касательных напряжений при нагружении П-образов;

– показано, что при скоростях деформации  $2000 \text{ с}^{-1}$  и выше эффектами теплопроводности можно пренебречь с достоверностью более 95%;

– для процессов динамического нагружения проведено моделирование на основе различных постановок задач;

– проведен теоретический анализ вклада термического разупрочнения в процесс локализации пластической деформации и разрушения в зависимости от скорости деформации в диапазоне  $10^2$ - $3 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ , который показал существенное влияние термического разупрочнения для сплава АМг6 для скоростей деформации, превышающих  $10^4 \text{ с}^{-1}$ .

**Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов):**

**использован** программный комплекс Abaqus для проведения с применением разработанной модели вычислительных экспериментов по деформированию и разрушению образцов для различных схем нагружения («П-образцы», «сдвиг-сжатие», пробивание преград);

**изложены** результаты анализа полученных на основе численных расчётов вкладов термического и дефектного разупрочнений в релаксацию напряжений в зависимости от скорости деформации;

**раскрыты** возможности предлагаемых моделей для учёта вкладов механизмов термопластической и структурной неустойчивости при описании эффектов локализации пластической деформации при динамическом нагружении;

**изучена** роль термического и дефектного разупрочнения в механизмы локализации пластической деформации при различных скоростях нагружения в диапазоне  $10^2 - 10^4 \text{ с}^{-1}$ ;

**проведена модернизация** системы полевых уравнений и соответствующего программного кода пользовательской процедуры для комплекса Abaqus для численного моделирования деформационного поведения материалов при динамическом нагружении.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработан** алгоритм количественной оценки вклада термического разупрочнения при различных скоростях деформации;

**определены** количественные оценки вкладов структурного и термического разупрочнения в процесс локализации деформации при динамическом нагружении в сопоставлении с данными экспериментов;

**создан** комплекс проблемно-ориентированных программ для ЭВМ для проведения численных экспериментов процессов деформирования и разрушения образцов при динамическом нагружении;

**представлена** методика определения характерной температуры для учета термического разупрочнения в рамках используемой модели.

