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 Билалов 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., **Билалов 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. **Билалов 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. **Билалов 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 C., Наймарк О.Б., Пантелеев И.А., **Билалов 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. **Билалов 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 решения 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, проделанную 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 ^{0}С. При математической формулировке задачи в разделе 2 предложено использовать критерий разрушения $\sqrt{\boldsymbol{p}:\boldsymbol{p}} \geq p_c$, мера $\sqrt{\boldsymbol{p}:\boldsymbol{p}}$ 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 ^{0}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 25ХН3МФС 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 $с^{-1}$ (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-образцов), сопоставлены результаты вычислительного и физического эксперимента для верификации методики определения касательных напряжений при нагружении П-образцов;

– показано, что при скоростях деформации 2000 $с^{-1}$ 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-$3\cdot10^4$ $с^{-1}$, который показал существенное влияние термического разупрочнения для сплава АМг6 для скоростей деформации, превышающих 10^4 $с^{-1}$.

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 $с^{-1}$;

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.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теория построена с использованием фундаментальных результатов механики деформируемого твердого тела, термодинамики сплошных сред и согласована с опубликованными экспериментальными данными;

идея базируется на подходах нелинейной механики деформируемого твердого тела с учётом мезоскопических дефектов;

использованы современные численные методы, для которых обоснована сходимость решений;

установлено качественное и количественное соответствие результатов численного моделирования данным экспериментов.

Личный вклад соискателя состоит в модификации модели деформируемого твердого тела с дефектами для описания процесса локализации пластической деформации в металлах и сплавах при динамическом нагружении, проведении расчетов, сопоставлении результатов моделирования с экспериментальными данными, разработке алгоритма идентификации и верификации параметров модели для учета термического разупрочнения, определения вкладов термического разупрочнения в релаксацию напряжений при различных скоростях деформации. Постановка задачи исследования, обсуждение результатов и подготовка публикаций проводились совместно с научным руководителем.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, концептуальности и взаимосвязи основных выводов.

На заседании 05 июня 2018 г. диссертационный совет принял решение присудить Билалову Д.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человека, из них 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящего в состав совета, дополнительно введено на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 16, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель
диссертационного совета Д 004.036.01
д.т.н., профессор, академик РАН
Матвеенко Валерий Павлович

_____ / Матвеенко В.П

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 004.036.01
д.ф.-м.н., доцент
Зуев Андрей Леонидович

_____ / Зуев А.Л.

19 июня 2018 г.

М.П.