

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Билалова Дмитрия Альфредовича «Механизмы локализации деформации и разрушения в металлах при динамическом нагружении», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

### **Актуальность темы диссертации.**

Разрушение пластичных материалов (металлы и сплавы), связанное с формированием полос адиабатического сдвига (ПАС), является характерным и интенсивно исследуемым процессом при динамическом нагружении. Объяснение закономерностей разрушения адиабатическим сдвигом является одним из основных направлений фундаментальных исследований в области физики и механики прочности и пластичности, имеет важное прикладное значение. Математические модели, которые способны адекватно описать данное явление, необходимы как для оценки надёжности и прочностных характеристик материалов и конструкций, так и для решения фундаментальных проблем материаловедения: описания связи механизмов структурной релаксации с пластичностью и разрушением материалов. Долгое время доминирующим объяснением локализации деформации при высокоскоростном деформировании являлся механизм термопластической неустойчивости, согласно которому тепловыделения в условиях адиабатичности существенно разупрочняют материал. Однако, в последнее десятилетие появились работы, отражающие существенную роль структурных изменений, обуславливающих релаксацию напряжений при динамическом нагружении. Поэтому построение математической модели, которая учитывала бы оба механизма разупрочнения – актуальная задача. Совокупность сформулированных задач и их решение составляют основу актуального исследования и его новизны в плане фундаментальных и методических постановок, реализованных в диссертации в области механики деформируемого твердого тела.

**Целью работы** является обоснование роли структурных переходов, обусловленных коллективным поведением дефектов, в инициировании процесса локализации пластической деформации и построение математической модели, которая учитывает как структурные изменения, так и термическое разупрочнение, и способна адекватно описывать деформационное поведение металлов при динамическом нагружении.

### **Данная цель реализуется при решении следующих основных задач:**

- Построение структурно-феноменологической модели динамического деформирования металлов и сплавов с использованием широкодиапазонных определяющих соотношений, учитывающих кинетику дефектов.
- Идентификация параметров модели для ряда материалов, а именно, для алюминиевых сплавов АМг6, А6061, Д16 и стали 25ХНЗМФС.
- Адаптация построенной модели к пакету прикладных программ Abaqus.
- Проведение численных экспериментов по динамическому деформированию образцов в условиях, близких к чистому сдвигу (АМг6), и пробиванию преград (АМг6, А6061, сталь 25ХНЗМФС).
- Количественная оценка вкладов термического и дефектного разупрочнений в общую релаксацию в процессе локализации пластической деформации.
- Сравнение расчетов с результатами оригинальных экспериментов, проведенных в лаборатории Физических основ прочности ИМСС УрО РАН.

**Поставленные цели и результаты обладают научной новизной, которую составляют:**

- Обобщение модели деформируемого твердого тела, описывающей связь структурных переходов, обусловленных дефектами, с релаксационными свойствами материалов, на

случай динамического деформирования металлов с учетом эффектов термического разупрочнения.

- Впервые развиваемая модель твердых тел с дефектами была применена для расчета процесса пробивания преград в двух- и трехмерной постановках.

- Впервые на основе предложенной модели была получена количественная оценка и сравнение дефектного и термического вкладов в разупрочнение материала, инициирующее локализацию пластической деформации при динамическом нагружении.

- Была предложена и апробирована методика определения параметра характерной температуры для учета термического разупрочнения в рамках используемой модели.

#### **Общая методология и методика исследования**

При построении полевых уравнений, описывающих деформационное поведение металлов и сплавов, использовались подходы теории определяющих соотношений. Численные расчёты процессов деформирования и разрушения материалов проводились методом конечных элементов. Параметры модели определялись путем решения задачи минимизации невязки (методом поиска) между теоретической и экспериментальной диаграммами деформирования.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Исследование представлено на 107 страницах, содержит 38 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 94 наименований.

**Во Введении** отмечается, что, несмотря на существование огромного количества различных определяющих соотношений для описания деформационного поведения материалов при динамическом нагружении, на данный момент не существует математической модели, которая учитывала бы оба механизма релаксации напряжений: дефектный и термический и способна давать количественную оценку вкладов каждого из данных механизмов. Также отмечается, что большинство моделей оперируют скалярным параметром поврежденности для учёта эволюции структуры, что не отражает закономерности структурных переходов, обусловленных дефектами при локализации пластической деформации. Обосновывается необходимость в построении математической модели, описывающей оба механизма разупрочнения - термического и структурного, когда последний, имея тензорную природу, отражает роль структурных переходов в ансамблях дефектов при развитии локализованного пластического течения.

**В первой главе** представлен обзор существующих представлений о физических закономерностях развития локализации пластической деформации при динамическом нагружении и соответствующих модельных представлениях. Отмечаются преимущества и недостатки существующих моделей и подходов к моделированию деформационного поведения материалов при динамическом нагружении, обосновываются постановки и методы решения в рамках которых предлагается комплексное решение, учитывающее основные механизмы локализации пластической деформации и разрушения адиабатическим сдвигом – автокаталитический механизм термического разупрочнения и механизм структурной релаксации, обусловленный коллективным поведением ансамблей дефектов.

**Вторая глава** посвящена построению математической модели на основе широкодиапазонных определяющих соотношений, базирующихся на статистико-термодинамических представлениях о нелинейном поведении сплошной среды с мезоскопическими дефектами. Обосновываются феноменологические эволюционные уравнения, связывающие релаксационную кинетику пластической деформации и нелинейную динамику тензорного параметра поврежденности, отражающие специальный вид неравновесной свободной энергии материала с дефектами. Представление свободной энергии отражает впервые установленные закономерности критического поведения в ансамбле дефектов, характеризующиеся формированием коллективных мод дефектов, определяющих механизмы локализованного пластического течения и локализации поврежденности. Полная система полевых уравнений записывается в терминах текущего

лагранжева подхода в скоростной формулировке. Обосновывается выбор объективной производной для расчёта тензора напряжений.

Проведена процедура идентификации и верификации неизвестных параметров модели для ряда материалов. Отмечается, что предложенный подход учитывает не только эволюцию структуры материала, но также описывает эффекты падения прочности и повышения пластичности металлов и сплавов с ростом температуры.

**Третья глава** посвящена исследованию механизмов локализации пластической деформации при динамическом нагружении методами вычислительного эксперимента на примере нескольких экспериментальных постановок, реализованных в Лаборатории физических основ прочности ИМСС УрО РАН. При решении каждой конкретной краевой задачи автор проводит сравнение результатов моделирования с соответствующим экспериментом для обоснования адекватности постановок и верификации получаемых результатов. Наиболее значимым результатом является количественный анализ вкладов термического разупрочнения и структурной релаксации в процесс локализации деформации в зависимости от скорости нагружения. Автором показано, что существуют такие скорости деформации, при которых влияние температуры на разупрочнение не является определяющим и решающую роль играют релаксационные процессы, обусловленные коллективным поведением ансамблей дефектов. Установлено также, что, начиная с определённых скоростей нагружения, роль температуры растёт и становится сопоставимой со вкладом механизмов структурной релаксацией. Для каждого материала соответствующие скорости деформации могут быть различны.

В целом диссертация представляет собой методически выверенное, комплексное теоретическое исследование механизмов локализации деформации и разрушения металлов и сплавов при динамическом нагружении. Необходимо отметить, что, несмотря на значительное количество работ по экспериментальному исследованию и моделированию деформационного поведения металлов при высокоскоростном деформировании, физика процесса формирования полос локализованного сдвига остается открытой. Автор использовал методы, апробированные в теории определяющих соотношений и численном моделировании, для теоретического изучения механизмов локализации деформации и формирования полос адиабатического сдвига.

Наиболее важными результатами диссертационной работы являются:

1. На основе широкодиапазонных определяющих соотношений среды с дефектами была построена математическая модель для описания деформационного поведения металлов и сплавов при динамическом нагружении (в диапазоне скоростей деформации  $10^2$ - $10^4$  с<sup>-1</sup>).
2. Предложена модификация модели, учитывающая зависимость от температуры одного из кинетических коэффициентов, что позволило учесть эффекты термического разупрочнения.
3. Предложена и апробирована методика определения констант модифицированной модели для описания температурного разупрочнения и эффекта повышения пластичности с ростом температуры деформирования.
4. Проведено моделирование процесса локализации пластического сдвига на примере экспериментальных схем «П-образец» и «Сдвиг-сжатие». Количественно оценены вклады структурной релаксации и температурного разупрочнения при динамическом нагружении. Показано, что для сплава АМгб существенное влияние термического разупрочнения на локализацию пластической деформации начинается при скоростях нагружения  $10^4$  с<sup>-1</sup> и выше. При меньших скоростях определяющую роль в процессах локализации пластической деформации играют релаксационные механизмы, обусловленные кинетикой дефектов. Результаты моделирования находятся в удовлетворительном соответствии с экспериментами, проведенными в ИМСС УрО РАН.

5. Проведено моделирование процессов локализации деформации и разрушения металлов применительно к постановкам задач пробивания дискообразных преград цилиндрическим ударником. Данные моделирования сравнивались экспериментами, проведенными в ИМСС УрО РАН, и находятся в удовлетворительном соответствии.
6. Проведен теоретический анализ вклада термического разупрочнения в процесс локализации пластической деформации и разрушения в зависимости от скорости деформации в диапазоне  $10^2$ - $3 \cdot 10^4$  с<sup>-1</sup>, который показал, что для сплава АМг6 существенное влияние термического разупрочнения начинается со скоростей  $10^4$  с<sup>-1</sup>, а для А6061 –  $2 \cdot 10^4$  с<sup>-1</sup>. Для материала АМг6 теоретический результат соответствует экспериментальным данным.

**Работа не свободна от недостатков** и уместны следующие замечания:

1. 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 (учет тензорного характера параметра повреждаемости и учет температурной зависимости кинетического коэффициента).
2. В работе проводится оценка зависимости от температуры различных параметров. В том числе приводится оценка влияния на теплоёмкость, достигающая 18%. Однако, зависимостью теплоёмкости от температуры в постановке задач не учитывается. Насколько это правомерно?
3. 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.

**Достоверность полученных в работе результатов и положений**, выносимых на защиту, обеспечивается использованием известных методов численного интегрирования (метод конечных элементов), сопоставлением результатов расчётов с данными экспериментов, проведением анализа сходимости.

В целом диссертационная работа Билалова Д.А. является самостоятельным законченным научным исследованием, обладающим внутренним структурным единством, соответствующим «Положению о порядке присуждения учёных степеней» ВАК РФ. Полученные результаты соответствуют поставленным целям и задачам. Выводы и положения, выносимые на защиту, следуют из содержания диссертации. Результаты работы достаточно полно опубликованы в отечественной и международной научной печати. Автореферат и публикации соответствуют содержанию работы и достаточно полно её представляют. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела, а именно следующим пунктам:

- п.1 «Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов...»;
- п.5 «Теория упругости, пластичности и ползучести»;
- п.6 «... механика разрушения твердых тел и критерии прочности ...»;
- п.7 «Постановка и решение краевых задач для тел ... при механических ... воздействиях ...»;
- п.8 «Математические модели и численные методы анализа применительно к задачам, не допускающим прямого аналитического исследования».


**Значение выводов** и положений, представленных в диссертации можно квалифицировать как значительный вклад в решение проблем, связанных с пониманием

механизмов локализации деформации и разрушения пластичных материалов (металлы и сплавы) при динамическом нагружении – важного раздела механики деформируемого твёрдого тела.

Считаю, что диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Билалов Дмитрий Альфредович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий лабораторией Нелинейной физики и механики материалов  
Федерального государственного бюджетного учреждения  
науки Института проблем сверхпластичности металлов  
Российской академии наук



Дмитриев Сергей Владимирович

Дата: 14 мая 2018 г.

450001, г. Уфа, ул. Степана Халтурина, д. 39  
Тел. (347) 223-64-07,  
E-mail: imsp@imsp.ru  
E-mail: dmitriev.serгей.v@gmail.com

Подпись Дмитриева С.В. заверяю  
Ученый секретарь  
ИПСМ РАН



Сафаров И.М.