

Отзыв

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

Диссертационная работа Билалова Д.А. посвящена теоретическому изучению механизмов локализации пластической деформации при динамическом нагружении материалов методами вычислительного эксперимента. Разработка математических моделей, использующих современные результаты механики деформируемого твердого тела, является при этом основой вычислительного эксперимента. В настоящее время существует ряд модельных представлений, описывающих поведение металлов при динамическом деформировании, однако комплексное исследование механизмов неустойчивости пластического сдвига, лежащих в основе механизмов разрушения адиабатическим сдвигом, предполагает комплексное изучение структурных и термических механизмов, которые позволят прогнозирование процессов разупрочнения. Данному **актуальному направлению посвящена** рецензируемая работа.

Представленные в трех главах диссертации (одна – обзорная и две оригинальных) теоретические исследования, в основном, посвящены развитию представлений о механизмах формирования полос адиабатического сдвига и определяющих соотношений, позволяющих проводить моделирование механических реакций и термодинамических свойств материалов при динамических воздействиях. Оригинальные главы посвящены построению математической модели, адекватной для описания исследуемых механизмов пластической деформации и разрушения материалов (вторая глава) и её

применению к комплексному исследованию поставленных задач (третья глава). Работа представлена на 107 страницах, содержит: 38 рисунков, 7 таблиц и 94 наименования в списке литературы.

Анализируя содержание глав диссертации, отметим **наиболее важные результаты**, имеющие оригинальный характер и составляющие предмет исследований, выносимых на защиту. Среди них математическая модель, связывающая механизмы релаксации с ростом дефектов и позволяющая описать процессы неупругого деформирования и разрушения металлов и сплавов при динамическом нагружении. Модель была построена с использованием **методов** теории определяющих соотношений на основе статистико-термодинамической теории дефектов и введением параметров, отвечающих за структурные изменения (масштабно-инвариантный параметр структурного скейлинга, тензор плотности микросдвигов) и температурное разупрочнение (зависимость вязкости от температуры, согласно аррениусовскому закону). Построенная модель адекватно описывает деформационное поведение материалов при различных скоростях деформирования (от 10^2 до 10^4 с⁻¹) и температурах, что подтверждается сравнением с экспериментальными данными. Построенная модель является новой и оригинальной. Важной составной частью работы является численная реализация построенной модели в виде программы (пользовательской процедуры) в конечно-элементном пакете Abaqus для проведения вычислительного эксперимента. Несомненным достоинством диссертации является разработка новых численных алгоритмов и их реализация в пакете прикладных программ. Существенно, что разработанные численные методики были применены к комплексному исследованию поведения материалов АМг6, А6061, сталь 25ХНЗМФС при динамическом нагружении. При этом обоснована роль кинетики дефектов, количественно оценены вклады термического и дефектного разупрочнений в процесс локализации пластической деформации и разрушения материалов в зависимости от скорости деформирования. Наконец, разработанный алгоритм обоснован как эффективный инструмент проверки

адекватности модели на основе данных натурального эксперимента с точки зрения эффекта термического разупрочнения.

Новизна перечисленных результатов состоит в следующем.

1. Обобщена модель деформируемого твердого тела, описывающая связь структурных переходов, обусловленных дефектами, с релаксационными свойствами материалов, на случай динамического деформирования металлов с учетом эффектов термического разупрочнения.
2. Впервые развивтая модель твердых тел с дефектами была применена для расчета процесса пробивания преград в двух- и трехмерной постановках.
3. 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.
4. Была предложена и проверена с использованием известных данных методика определения характерной температуры для учета эффектов термического разупрочнения в рамках используемой модели.

Достоверность результатов работы не вызывает сомнений. Результаты моделирования, полученные автором, хорошо согласуются с известными литературными данными и данными экспериментов, проведенных в Лаборатории физических основ прочности ИМСС УрО РАН, где выполнена работа. Также важным критерием адекватности вычислительной модели и расчётов является проведение анализа сходимости численного решения и его зависимости от масштаба дискретизации сплошной среды, применительно к задачам разрушения. Показано, что существует такой характерный размер сетки, при котором численное решение перестаёт быть зависимым от характерного размера конечного элемента.

Сделаем некоторые замечания по работе.

1) 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).

2) 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.

Сделанные замечания, безусловно, не снижают ценности результатов, полученных в диссертации, и относятся к предложениям по развитию исследований.

В целом диссертационная работа Д.А. Билалова отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатской диссертации, является заметным вкладом в развитие представлений о механизмах локализации деформации и разрушения металлов при динамическом деформировании.

Полученные результаты соответствуют поставленным целям и задачам.

Представленный в диссертации материал получил достаточную апробацию на международных и российских конференциях. Количество и качество публикаций соответствуют рекомендациям ВАК.

Считаю целесообразным рекомендовать данный материал к включению в курсы по математическому моделированию в механике деформируемого твёрдого тела, а также включение материалов работы в курсы, связанные с оценкой прочностных характеристик материалов и конструкций.

Работа написана хорошим языком, последовательность изложения продумана и отражает логику исследования, стиль изложения доказательный.

Текст автореферата и публикаций достаточно полно и точно отражают содержание диссертации.

Заключение

Содержание диссертации соответствует формуле специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела и области исследований: 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».

Работа удовлетворяет критериям, которым должна отвечать диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, установленным п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Правительством РФ от 24 сентября 2013 г. № 842. **Личный вклад** автора в диссертационную работу у оппонента не вызывает сомнения.

Диссертация Д.А. Билалова «Механизмы локализации деформации и разрушения в металлах при динамическом нагружении» является законченной научной работой. Она содержит новые результаты, которые представляют

интерес для механики деформируемого твёрдого тела и развития представлений и механизмах релаксации напряжений при динамическом нагружении металлов. Существенно, что новые результаты получены с использованием методов математического моделирования

Считаю, что диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям, 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.

« 21 » мая 2018 г.

Официальный оппонент, доктор физ.- мат. наук, главный научный сотрудник Института прикладной математики м. М.В. Келдыша РАН

Федеральное государственное учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН". Адрес: 125047, г. Москва, Миусская пл., д.4, Тел.: +7 499 220-72-23

E-mail: zmitrenko@imamod.ru

/Змитренко Н.В./

Подпись главного научного сотрудника,
д.ф.-м.н. Н.В. Змитренко заверяю

Учёный секретарь ИИМ им. М.В. Келдыша РАН,
к.ф.-м.н.



/Маслов А.И./