ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Копытского Владислава Олеговича на тему «Исследование откольной повреждаемости в бронзах БрАЖ9-4, БрАМц9-2 и стали 08Х18Н10Т при ударно-волновом нагружении», представленную к защите на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Актуальность темы.

Откол представляет собой процесс разрушения внутренних объёмов ударно-сжатого твёрдого образца встречными волнами разгрузки. Длительность откола оказывается на уровне микросекунд и меньше, а растягивающие напряжения достигают гигапаскальных значений. В связи с этим исследование откола целесообразно с фундаментальной точки зрения, поскольку предоставляет возможность экспериментального изучения закономерностей разрушения твёрдых тел в субмикросекундном временном диапазоне. Однако исследования откольного разрушения важны и в прикладном отношении, поскольку позволяют определять такие функциональные параметры сопротивляемости высокоскоростному разрушению реальных конструкций как откольная прочность, структурные характеристики и пост-эффекты откола.

В диссертации Владислава Олеговича Копытского приведены результаты исследования особенностей процессов образования откольной повреждаемости алюминиевых бронз БрАЖ9-4 и БрАМц9-2 и аустенитной стали 08Х18Н10Т. Представленная работа в значительной мере является развитием подхода Буравовой С.Н., согласно которому морфология повреждений при кавитационной и твердотельной эрозии имеет откольную природу, а сам процесс разрушения определяется волновыми явлениями в материале. Изучение откольной повреждаемости позволяет понять, как и при каких условиях в материале зарождаются и растут трещины. Эти данные помогают оценить, насколько быстро материал может разрушаться под динамической нагрузкой (удар, взрыв, резкие перепады давления, вибрации, кавитационная и твердотельная эрозия), и на основе этого прогноза определить срок службы ответственных изделий.

Полученные в работе данные могут быть использованы для прогнозирования остаточного ресурса деталей эксплуатируемых в агрессивных средах в условиях длительного воздействия динамических нагрузкок (в том числе гребных винтов, рабочих колёс насосов, лопаток гидротурбин и трубопроводов), взрывного компактирования изделий и др., чем и определяется практическая и научная значимость.

Структура и объём диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, в котором излагаются основные результаты работы.

Содержание работы.

Во введении показана актуальность работы, её цели, задачи, научная новизна, практическая значимость и защищаемые положения.

В первой главе

Представлен подробный обзор современной литературы, что даёт достаточно полное представление о состоянии проблемы. Подробно рассказано о выбранных для исследования материалах (БрАЖ9-4, БрАМц9-2, сталь 08Х18Н10Т), о структуре и свойствах и преимуществах их характеристик в тех или иных областях. Значительное внимание уделено анализу методов ударно-волнового нагружения. Отдельный интерес представляет анализ литературных данных по кавитационной эрозии и существующим подходам к оценке кавитационной стойкости материалов. На основе обзора автором корректно сформулированы цель и задачи исследования.

Во **второй главе** представлены материалы и методы исследований. Приведены характеристики и зёренная структура исследуемых образцов. Представлены экспериментальные схемы проведенных ударно-волновых экспериментов (метание пластины-ударника и обжатие скользящей детонационной волной), Описаны используемые методики: высокоскоростная съёмка, металлография, сканирующая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ и измерение микротвердости. При проведении исследований использован комплексный подход, позволяющий оценить и параметры нагружения, и структурные особенности материала.

Представленные и используемые в работе методики обработки экспериментальных данных соответствуют современному уровню.

В **третьей главе** изложены теоретические основы откольной повреждаемости и выполнена оценка параметров ударно-волнового нагружения. Рассмотрены волновые картины при нагружении ударником и при обжатии скользящей детонационной волной. Отдельно рассмотрено формирование полос локализованной деформации в рамках концепции стоячих волн.

Проведены специальные эксперименты по определению скорости метания пластины-ударника с помощью высокоскоростной съемки. Выполнены расчёты скорости метания пластины-ударника и давления соударения, сопоставленные с данными высокоскоростной съёмки.

Подобранные режимы нагружения создают в материале волны разрежения с амплитудой растягивающих напряжений в разы превышающие откольную

прочность и позволяют выявить особенности откольного разрушения в исследуемых материалах.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию откольной повреждаемости в бронзах БрАЖ9-4 и БрАМц9-2. Динамическому нагружению подвергались как сплошные образцы, у которых нет внутренней свободной поверхности, так и образцы с отверстием. В результате показано, что в сплошных цилиндрических образцах при обжатии скользящей детонационной волной развитая откольная повреждаемость не формируется, тогда как наличие центрального сквозного отверстия приводит к образованию кольцевых откольных трещин. Измеренная микротвердость показала, что существенное деформационное упрочнение материала формируется в приповерхностной зоне. При повторном нагружении обжатием образцов бронзы обнаружен эффект частичного залечивания откольных дефектов, что является новым и интересным результатом.

В **пятой главе** исследована откольная повреждаемость в стали 08Х18Н10Т при обжатии полых цилиндров скользящей детонационной волной с внутренней преградой из компакта Ni-Al. Используемая схема нагружения позволила одновременно исследовать схлопывание полой оболочки и взаимодействие оболочки с преградой в виде компакта. Установлено, что в сечениях, удалённых от компакта на расстояние до 5 мм, происходит практически полное схлопывание полости, при этом образуются радиальные откольные трещины между складками на внутренней поверхности, переходящие в полосы локализованной деформации. Кроме этого, в центральной полости зарегистрировано наличие следов интерметаллидов NiAl. Увеличение диаметра заряда, а значит и увеличение длительности импульсного нагружения существенно снижает повреждаемость. В **заключении** представлены основные выводы по результатам диссертационной работы.

Научная новизна.

В диссертации В.О. Копытского представлен ряд новых закономерностей, имеющих существенное значение для технологии взрывной обработки металлов.

В работе экспериментально установлено, что в сплошных цилиндрических образцах, подвергаемых обжатию скользящей детонационной волной, откольная повреждаемость не возникает. В то же время в образцах с центральным сквозным отверстием формируются кольцевые откольные трещины, распространяющиеся параллельно внешней и внутренней границам. Этот эффект влияния геометрии свободных поверхностей на механизм откольного разрушения металлов подтверждён на примере бронзовых сплавов БрАЖ9-4 и БрАМц9-2 при их ударно-волновом нагружении.

Экспериментально выявлен и подтверждён новый эффект частичного залечивания откольной повреждаемости в бронзовых сплавах при повторном

ударно-волновом нагружении, реализуемом посредством обжатия скользящей детонационной волной. Установлено, что повторное нагружение способствует уменьшению числа откольных трещин, смыканию их берегов и повышению микротвёрдости в зоне первичных трещин — это указывает на релаксацию напряжений и частичное восстановление сплошности материала.

В ходе исследования впервые установлено, что при обжатии полых стальных цилиндров с внутренней преградой из компакта Ni-Al подавление динамической неустойчивости достигается за счёт увеличения длительности импульсного нагружения при одновременном снижении параметров ударной волны. Это предотвращает формирование складок на внутренней поверхности, исключает появление радиальных трещин и обеспечивает сохранение целостности наружной поверхности цилиндра.

Выявлены закономерности деформационного упрочнения материалов, которые дают возможность контролируемо формировать дефектную структуру за счёт варьирования параметров и схем нагружения.

Практическая значимость.

Результаты работы имеют непосредственное практическое применение. Установленные зависимости между параметрами нагружения и степенью разрушения позволяют целенаправленно реализовывать различные уровни повреждённости материалов – от единичных микропор до развитой сети магистральных трещин – и контролировать формирование дефектной структуры. Полученные данные могут быть использованы при разработке технологических режимов взрывного компактирования для получения цельных изделий без дефектов, а также для прогнозирования остаточного ресурса деталей, работающих в условиях кавитационных и ударных нагрузок. Обнаруженный эффект частичного залечивания откольных дефектов при повторном сжимающем нагружении открывает перспективы для разработки технологий импульсного восстановления повреждённых изделий, что особенно актуально для ответственных узлов гидроэнергетического и судового оборудования.

Отдельно следует отметить личный вклад соискателя. В.О. Колпытским выполнен анализ литературных данных по теме диссертации, совместно с научным руководителем сформулированы цель и задачи работы. Соискателем лично и при его непосредственном участии подготовлены и проведены эксперименты по ударно-волновому нагружению образцов из бронз и стали методами метания пластины-ударника и обжатия скользящей детонационной волной. Диссертантом исследовано также влияние геометрии свободных поверхностей на характер откольного разрушения, установлены закономерности деформационного упрочнения и изменения структуры материалов, выполнен

анализ микроструктуры, фазового состава и измерений микротвердости металлических образцов после их ударно-волновой обработки.

Достоверность полученных результатов подтверждена комплексом взаимодополняющих аттестованных методов исследования, включая высокоскоростную съёмку, оптическую и сканирующую электронную микроскопию, рентгенофазовый анализ, а также измерения микротвёрдости по Виккерсу. Обоснованность выводов опирается на применение современных физических методов, воспроизводимость экспериментальных данных, а также на соответствие полученных результатов опубликованным литературным данным и теоретическим расчётам

Работа успешно апробирована на международных и всероссийских конференциях. По теме диссертации опубликовано 22 печатные работы, в том числе 9 статей в реферируемых журналах из перечня ВАК и баз Web of Science/Scopus и 13 тезисов.

Автореферат хорошо структурирован, а его содержание полностью соответствует тексту диссертации и вместе со списком публикаций, дает полное представление о выполненной работе. В автореферате чётко обозначены поставленные задачи, отражены ключевые результаты и сформулированы итоговые выводы диссертации.

Содержание диссертации полностью соответствует паспорту научной специальности 1.3.17 – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» (отрасль науки – технические), в частности пунктам 1, 4 и 5, охватывающим поведение веществ и структурно-фазовые переходы в экстремальных условиях, закономерности распространения и устойчивость ударных волн, а также процессы, порождаемые взрывчатым превращением и взаимодействием волн со средой.

Замечания по диссертационной работе.

1) Как известно, полного схлопывания металлических оболочек при обжатии может не происходить, если мощность заряда ВВ невелика и, наоборот, в случае заряда большой мощности после схлопывания возможен разлет оболочки. Известно также, что неустойчивость радиального схождения цилиндрических оболочек под действием скользящей детонации определяется абсолютным размером оболочки, а не отношением её толщины к радиусу. В этой связи представляется необходимым провести предварительный выбор геометрических размеров (диаметр оболочки и толщина) обжимаемой оболочки. Однако в диссертации этому вопросу не уделено должного внимания.

2) В тексте диссертации на стр 45 отмечается, что «Время действия растягивающих напряжений в зонах интерференции при этом практически равно нулю, что объясняет хрупкий характер откольных повреждений даже в пластичных материалах.» Время действия растягивающих напряжений действительно мало и может составлять от наносекунд до микросекунд. Однако, в случае взрывного эксперимента учёт этих времён может оказаться определяющим и, соответственно, пренебрежение временем действия растягивающих напряжений станет некорректным.
3) В тексте диссертации на стр. 80. «Нагружение медных сплавов ударными волнами с давлением до 25 ГПа не изменяет их внутреннюю микроструктуру [156].» В указанной ссылке исследована мелкозернистая медь, в то время как в диссертации исследуются бронзы. Поскольку в работе не рассматривается изменение зёренной структуры после ударного воздействия было бы уместно дать пояснение взаимосвязи результатов для меди и для бронз.
4) В тексте диссертации на стр. 110 Рисунок 5.1 допущена опечатка. На рисунке представлены два одинаковых снимка, в автореферате – два разных снимка.

Указанные замечания касаются отдельных фрагментов работы или деталей интерпретации полученных соискателем результатов работы и не подвергают сомнению достоверность полученных опорных экспериментальных данных и главных выводов диссертации.

Заключение.

Диссертационная работа Копытского Владислава Олеговича «Исследование откольной повреждаемости в бронзах БрАЖ9-4, БрАМц9-2 и стали 08Х18Н10Т при ударно-волновом нагружении» является научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научно-техническая задача установления закономерностей развития и подавления откольной повреждаемости металлических конструкционных материалов при различных схемах ударно-волнового нагружения.

Таким образом, диссертация Копытского Владислава Олеговича является научно-квалификационной работой, в которой изложены научно-технические решения, имеющие существенное значение для развития технологий взрывной обработки металлов и сплавов. Работа выполнена в соответствии с требованиями п. 9 Положения о порядке присуждения учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в действующей редакции), а её автор заслуживает присуждения учёной степени

кандидата технических наук по специальности 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Голышев Андрей Анатольевич

кандидат физико-математических наук
специальность 01.04.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Старший научный сотрудник лаборатории высоких динамических давлений Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук (ФИЦ ПХФ и МХ РАН)
142432, г. Черноголовка, проспект академика Семенова, д. 1,
Тел. +7 49652 27225, e-mail: golyshev@ficp.ac.ru

03 ноября 2026 г.

Я, Голышев Андрей Анатольевич, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись Голышева А.А. заверяю.
Ученый секретарь ФИЦ ПХФ и МХ РАН
д.х.н. Психа Б.Л.