ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Копытского Владислава Олеговича

«Исследование откольной повреждаемости в бронзах БрАЖ9-4, БрАМц9-2 и стали 08Х18Н10Т при ударно-волновом нагружении», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.17 - Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Актуальность избранной темы и выполненной работы

Интенсивное развитие современных промышленных отраслей обуславливает необходимость повышения надёжности и ресурса конструкционных материалов, работающих в экстремальных условиях. Алюминиевые бронзы марок БрАЖ9-4, БрАМц9-2 и коррозионно-стойкая сталь 08Х18Н10Т широко востребованы в судостроении (гребные винты, корпуса насосов, клапаны), энергетике (лопатки гидротурбин, трубопроводы) и других отраслях, где детали подвергаются интенсивному кавитационному, эрозионному и ударно-волновому воздействию. Надёжность и ресурс таких систем непосредственно зависят от способности материалов противостоять комплексу динамических нагрузок в агрессивных средах.

Длительное время повреждаемость материалов при эрозии рассматривалась преимущественно с позиций квазистатического воздействия. Однако в работах Буравовой С.Н. и других исследователей было доказано, что морфология повреждений при кавитационной и твердотельной эрозии соответствует динамическому виду нагружения и имеет откольную природу. Существующие модели эрозии, основанные на классической механике разрушения, не способны объяснить ключевые экспериментальные факты: образование кратеров и трещин вокруг зоны контакта, формирование волнистого рельефа поверхности, появление хлопьевидных продуктов изнашивания. В связи с этим актуальным является установление закономерностей откольной повреждаемости в указанных материалах при различных схемах ударно-волнового нагружения и поиск режимов, обеспечивающих получение изделий с минимальным количеством дефектов.

Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования Копытского В.О., а также цели и задачи, поставленные в работе, не вызывают сомнений.

Содержание диссертационной работы

Структура диссертационной работы соответствует современным требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 169 наименований. Общий объём работы составляет 148 страниц, включая 45 рисунков и 6 таблиц.

Во введении диссертационной работы обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели и задачи работы, представлены научная новизна и практическая значимость результатов, сформулированы защищаемые положения.

Глава 1 содержит аналитический обзор публикаций, соответствующих теме диссертации. В обзоре дана характеристика алюминиевых бронз БрАЖ9-4 и БрАМц9-2, а также высоколегированной хромоникелевой стали с 08Х18Н10Т, структура и свойства указанных материалов. Рассмотрены современные методы ударно-волнового нагружения (взрывное, ударное, лазерное), деформационные процессы при динамическом нагружении (полосы локализованной деформации, адиабатический сдвиг), механизмы и модели откольного разрушения, а также подходы к оценке кавитационной стойкости материалов и методы её повышения. На основании изученной литературы сформулированы выводы, из которых вытекают цели и задачи диссертационной работы.

Глава 2 представляет собой методическую часть работы, в которой описаны характеристики исходных материалов, схемы ударно-волнового нагружения (метание пластины-ударника и обжатие скользящей детонационной волной), методы высокоскоростной съёмки (камеры «Наногейт-4БП» и «Наногейт-16БП»), металлографии, сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового анализа и измерения микротвердости. Подробно описана методика подготовки образцов, включая изготовление продольных и поперечных шлифов и их травление. Все изложенные методики позволяют детально и достоверно изучить как процесс ударно-волнового нагружения, так структуру и свойства полученных материалов.

В главе 3 представлены теоретические основы откольной повреждаемости и оценка параметров ударно-волнового нагружения. Рассмотрены волновые картины, реализующиеся при соударении образца с ударником и при обжатии скользящей детонационной волной. Показано, что при соударении с пластиной-ударником, диаметр которой превышает диаметр образца, существенную роль играют боковые волны разгрузки; их

фокусировка на оси образца приводит к образованию иглоподобных (осевых) откольных трещин. Аналитическое рассмотрение торможения удлинённого ударника выявило периодический характер нагружения мишени, обусловленный многократными отражениями волн сжатия и разгрузки в ударнике, что приводит к генерации серии импульсов сжатия и образованию дополнительных очагов повреждения (кольцевых трещин и полос локализованной деформации). Обосновано, что при обжатии цилиндрических образцов скользящей детонационной волной реализуются условия, близкие к цилиндрической кумуляции; рост давления ограничивается развитием неустойчивости движения и образованием на фронте ударной волны маховских конфигураций. В рамках концепции стоячих волн и их гармоник показано, что полосы локализованной деформации являются результатом интерференции волн разгрузки в узлах стоячих волн при напряжениях, недостаточных для образования макротрещины, но превышающих динамический предел текучести. Проведены расчёты скорости метания пластины-ударника по модели Гарни и давления соударения методом ударных адиабат, которые сопоставлены с данными высокоскоростной съёмки.

В главе 4 представлены результаты экспериментального исследования откольной повреждаемости в бронзах БрАЖ9-4 и БрАМц9-2 при нагружении метанием пластины-ударника и обжатии скользящей детонационной волной. Установлено, что при нагружении метанием пластины-ударника локализация пластической деформации проявляется в виде большого количества микротрещин, пор размером от 10 до 100 мкм и полос скольжения дислокаций внутри зёрен. Характер распространения трещин – транскристаллитный, при этом размер зёрен не изменяется. Показано, что места локализации деформации определяются геометрией образца (расположением боковых поверхностей – источников волн разгрузки). Обнаружено, что растягивающие напряжения в зонах интерференции волн разгрузки, не превышающие откольной прочности, создают полосы локализованной деформации, а превышающие её – откольные трещины. Установлено, что откольная повреждаемость при обжатии скользящей детонационной волной сплошных бронзовых образцов не возникает ни при высоте заряда 30 мм, ни при 40 мм, что обусловлено особенностями волновой картины в сплошном цилиндре. Измерения микротвердости выявили чёткую зависимость от глубины: максимальные значения зафиксированы на глубине 2-6 мм (355 HV для БрАЖ9-4, 349 HV для БрАМц9-2). В образцах, нагруженных без обоймы, радиальное растекание материала приводит к дополнительному упрочнению: средняя

микротвердость возрастает до 297 HV для БрАЖ9-4 (прирост 56 %) и до 296 HV для БрАМц9-2 (прирост 64 %). В обойме, ограничивающей радиальное течение, средний прирост составляет 40 % для БрАЖ9-4 и 57% для БрАМц9-2. Обжатие скользящей детонационной волной вызывает деформационное упрочнение по всему объёму: средняя микротвердость БрАЖ9-4 возрастает до 253 HV (прирост 33 %), БрАМц9-2 – до 264 HV (прирост 47 %). Впервые обнаружен эффект частичного залечивания откольной повреждаемости в бронзах при повторном ударно-волновом нагружении методом обжатия: повторное нагружение сокращает количество видимых трещин, наблюдается смыкание берегов трещин и частичное восстановление целостности зёрен, что подтверждается ростом микротвердости в зоне первичных трещин на 17-23 %.

В главе 5 исследована откольная повреждаемость в стали 08Х18Н10Т при обжатии полых цилиндров скользящей детонационной волной с внутренней преградой из компакта Ni-Al. Показано, что толщина стенки образцов увеличилась в 2,5 раза (с 2 до 5 мм); в сечениях, удалённых от компакта на расстояние до 5 мм, происходит практически полное схлопывание полости (диаметр отверстия уменьшился с 10 до 0,18 мм). Установлено, что повреждаемость при полном схлопывании характеризуется образованием радиальных откольных трещин, возникающих между складками на внутренней поверхности и переходящих в полосы локализованной деформации. Методом ЭДС и РФА подтверждено наличие следов интерметаллидов NiAl в центральной полости образца 1; в образце 2 синтез Ni-Al завершён полностью. Показано, что средняя микротвердость в обоих образцах увеличивается на 60–65 % после ударно-волнового нагружения; максимальные значения (до 600 HV) зафиксированы вдоль трещин, минимальные (525 HV) – в месте расположения полос локализованной деформации. Установлено, что наличие дополнительного слоя песка на внешней поверхности заряда ВВ увеличивает длительность ударно-волнового нагружения (примерно на 10 %), что существенно снижает повреждаемость околоосевой зоны и внешней поверхности. Сформулирован волновой механизм образования откольной повреждаемости: показано, что она возникает только при интерференции двух волн разгрузки – от внутренней свободной поверхности и от внешней; заполнение полости продуктами синтеза NiAl препятствует формированию одной из волн разгрузки, что исключает возникновение растягивающих напряжений и, как следствие, откольной повреждаемости в данной зоне.

В заключении представлены основные выводы по результатам диссертационной работы.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы

Представленная диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне, обоснованность и достоверность полученных результатов и выводов подтверждается большим объёмом полученных экспериментальных данных, применением современного аналитического оборудования для исследования параметров процесса нагружения, микроструктурного анализа, а также сопоставлением результатов с существующими литературными данными. Предложенные экспериментальные методики и проведённые исследования в полной мере подтверждают обоснованность выводов по данной работе.

Основные результаты диссертационной работы в достаточной степени апробированы, неоднократно докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях. По результатам диссертационной работы опубликовано 22 печатные работы, из них 9 статей в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК и базы данных Web of Science и Scopus, и 13 тезисов в сборниках научных трудов конференций.

Научная новизна полученных результатов, выводов, сформулированных в диссертации

Научная новизна результатов заключается в проведённом впервые исследовании влияния геометрии свободных поверхностей и длительности импульсного нагружения на характер откольного разрушения бронз БрАЖ9-4, БрАМц9-2 и стали 08Х18Н10Т. Установлено, что в сплошных цилиндрических образцах при обжатии скользящей детонационной волной откольная повреждаемость не формируется, а наличие центрального сквозного отверстия приводит к образованию кольцевых откольных трещин, распространяющихся параллельно внешней и внутренней границам.

Впервые обнаружен эффект частичного залечивания откольной повреждаемости в бронзовых сплавах БрАЖ9-4 и БрАМц9-2 при повторном ударно-волновом нагружении методом обжатия скользящей детонационной волной. Показано, что повторное нагружение приводит к сокращению количества откольных трещин, смыканию их берегов и росту микротвердости в зоне первичных трещин на 17–23 %.

Впервые показано, что увеличение длительности импульсного нагружения (на 10 %) при обжатии полых стальных цилиндров с внутренней преградой из компакта Ni-Al при одновременном снижении параметров ударной волны (давление с 3,5 до 1,9 ГПа, скорость детонации с 3750 до 3150 м/с) подавляет развитие динамической неустойчивости: складки на

внутренней поверхности не образуются, радиальные трещины отсутствуют, наружная поверхность цилиндра сохраняет целостность.

Научная и практическая значимость

Полученные результаты расширяют представления о природе процессов откольного разрушения в гетерогенных материалах при ударно-волновом нагружении. Установленные зависимости между параметрами нагружения (скоростью и давлением) и степенью разрушения позволяют целенаправленно реализовывать различные уровни повреждённости материалов (от единичных микропор до развитой сети магистральных трещин) и контролировать формирование дефектной структуры.

Практическая значимость работы заключается в том, что 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. Показана принципиальная возможность частичного залечивания откольных дефектов при повторном сжимающем нагружении, что открывает перспективы для разработки технологий импульсного восстановления повреждённых изделий.

Проведённые исследования позволяют сделать вывод о существенном научном вкладе данного диссертационного исследования в развитие области физики экстремальных состояний вещества и динамической прочности материалов.

Замечания по тексту диссертационной работы

Несмотря на высокий уровень проведенных исследований, к диссертационной работе имеется ряд замечаний:

Замечания по диссертационной работ

Несмотря на высокий уровень проведенных исследований, к диссертационной работе имеется ряд замечаний:

1. В диссертационной работе для моделирования повреждений, возникающих при кавитационном и эрозионном воздействии, используются методы ударно-волнового нагружения. Однако остается не вполне ясным, насколько корректно сопоставление результатов однократного высокоинтенсивного воздействия с процессами кавитационного разрушения, характеризующимися многократным циклическим нагружением материала.

2. При исследовании откольной повреждаемости бронз БрАЖ9-4 и БрАМц9-2 автор связывает различия в характере разрушения с особенностями их фазового состава и исходной микроструктуры. Вместе с тем недостаточно подробно рассмотрено влияние размеров зерен и распределения структурных составляющих на зарождение и распространение откольных трещин. Представляется целесообразным дополнить обсуждение результатов анализом роли межфазных и межзёренных границ в развитии повреждаемости.

3. В работе показано, что наличие центрального сквозного отверстия в цилиндрических образцах существенно изменяет характер откольного разрушения и способствует образованию кольцевых трещин. Однако не рассмотрено влияние диаметра отверстия и толщины стенки образца на формирование повреждений. Возникает вопрос, сохраняются ли установленные закономерности при изменении геометрических параметров образцов?

4. Автором установлено значительное увеличение микротвердости исследованных бронз после ударно-волнового нагружения, достигающее 56–64 % при использовании пластины-ударника. Однако в работе недостаточно подробно обсуждаются физические механизмы такого упрочнения. В частности, не вполне ясно, каков относительный вклад увеличения плотности дислокаций, измельчения структурных элементов и возможных фазовых превращений в наблюдаемое изменение механических свойств.

5. В пятой главе диссертации показано, что увеличение длительности импульсного нагружения приблизительно на 10 % сопровождается уменьшением повреждаемости стальных цилиндрических образцов. Однако при этом одновременно изменяются и другие параметры нагружения, в частности давление ударной волны снижается с 3,5 до 1,9 ГПа. В связи с этим не вполне обоснованным представляется вывод об определяющем влиянии именно длительности импульса. Желательно более подробно разграничить влияние продолжительности воздействия и максимального давления на характер разрушения материала.

Заключение

Указанные замечания по большей части носят редакционный характер и не могут снизить ценность и значимость диссертационной работы Копытского Владислава Олеговича. Она представляет собой законченное

исследование, выполненное на высоком научном уровне, содержит большое количество новых и важных экспериментальных данных, выводы по результатам работы обоснованы, а автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Копытского Владислава Олеговича «Исследование откольной повреждаемости в бронзах БрАЖ9-4, БрАМц9-2 и стали 08Х18Н10Т при ударно-волновом нагружении» по объёму полученных результатов и научной значимости диссертация соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Копытский Владислав Олегович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.17 — «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

Официальный оппонент,
заведующий кафедрой «Сварочное, литейное производство и материаловедение» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», доктор технических наук (05.16.09 – материаловедение (машиностроение)), профессор Розен Андрей Евгеньевич

Тел. +7 (8412) 66-63-31. E-mail: metal@pnzgu.ru.
440026 г. Пенза, Пензенская область, ул. Красная, д.40.

Я, Розен Андрей Евгеньевич, даю согласие на обработку моих персональных данных, связанную с защитой диссертации и оформлением аттестационного дела В.О. Копытского.

15.10.2026 Розен Андрей Евгеньевич

Подпись А.Е. Розена удостоверяю
Ученый секретарь ФГБОУ ВО «ПГУ»,
кандидат технических наук, доцент О.С. Дорофеева