«УТВЕРЖДАЮ»
И.о. директора
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института гидродинамики
им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения
Российской академии наук
доктор физико-математических наук

_____ Е.М. Рудой

«14» 10 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу 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 экстремального состояния вещества

Актуальность темы диссертации

Алюминиевые бронзы марок БрАЖ9-4, БрАМц9-2 и коррозионно-стойкая сталь 08Х18Н10Т относятся к категории конструкционных материалов, широко востребованных в производстве критически важных узлов, работающих в экстремальных условиях. В судостроении изготавливаемые из них гребные винты, корпуса насосов и клапаны подвергаются интенсивному кавитационному воздействию в морской воде. В энергетике эти материалы применяются для изготовления лопаток гидротурбин и трубопроводов, испытывающих высокие давления, ударные нагрузки и эрозионное воздействие твёрдых частиц. Таким образом, надёжность и ресурс сложных технических систем непосредственно зависят от способности данных 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, возникающих 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.

Особый интерес представляет эффект образования продольных канальных микро- и макротрещин под кратером, возникающий при различных видах импульсного воздействия (лазерная обработка, взрыв контактного заряда ВВ, удар водяной струи). В работах Буравовой С.Н. это явление получило название эффекта «ужаления», однако его природа долгое время оставалась необъяснённой. В связи с этим актуальным является изучение влияния длительности импульсного нагружения на повреждаемость стальных цилиндрических оболочек и поиск режимов, обеспечивающих получение изделий с минимальным количеством дефектов.

Тема диссертационной работы Копытского В.О. актуальна как с точки зрения фундаментальных исследований в области физики экстремальных состояний вещества, так и с практической точки зрения для повышения надёжности и ресурса деталей, работающих в условиях динамических нагрузок в агрессивных средах.

Структура и основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы из 169 наименований. Общий объём диссертации составляет 148 страниц, включая 45 рисунков и 6 таблиц.

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, аргументирована научная новизна, показана научная и практическая ценность полученных результатов, перечислены основные положения, выносимые на защиту. Дана характеристика научных публикаций и личного вклада соискателя.

В первой главе обзор имеющихся литературных данных по химическому составу, структуре и свойствам алюминиевых бронз БрАЖ9-4 и БрАМц9-2, а также аустенитной стали 08Х18Н10Т. 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.

Во второй главе описаны объекты и методы исследований. В качестве объектов исследования выбраны цилиндрические образцы из бронз БрАЖ9-4 и БрАМц9-2 и оболочки из стали 08Х18Н10Т. Описаны методики подготовки образцов, схемы ударно-волнового нагружения (метание пластины-ударника и обжатие скользящей детонационной волной), методы высокоскоростной съёмки,

металлографии, сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового анализа и измерения микротвердости.

В третьей главе 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 ПЛД). 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 (выступов). 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 ($V = 2{,}4$ км/с) и давления соударения методом ударных адиабат ($P \approx 32$ ГПа при $v_0 = 2400$ м/с), которые сопоставлены с данными высокоскоростной съёмки ($v_0 = 1{,}5$-$1{,}7$ км/с).

В четвертой главе 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 (формирование затухающих колебательных процессов при многократных переотражениях, недостаточная амплитуда растягивающих напряжений). 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 пятой главе 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, т.е. в 55,5 раза). Установлено, что повреждаемость при полном схлопывании характеризуется образованием радиальных откольных трещин, возникающих между складками на внутренней поверхности и переходящих в полосы локализованной деформации; в сечениях вблизи компакта полного обжатия не происходит, в околоосевой зоне сохраняется полость меньшего диаметра. Методом ЭДС и РФА подтверждено наличие следов интерметаллидов NiAl в центральной полости образца 1; в образце 2 синтез Ni-Al завершён полностью, следов интерметаллидов не обнаружено. 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 ПЛД. Установлено, что наличие дополнительного слоя песка на внешней поверхности заряда ВВ увеличивает длительность ударно-волнового нагружения (примерно на 10 %, что подтверждено сравнением скоростей обжатия: υ_1 = 1290 м/с без песка и υ_2 = 1170 м/с с песком), 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 заключительной части представлены основные выводы по результатам диссертационной работы.

Диссертация является самостоятельной работой, обобщившей результаты, полученные лично автором или в соавторстве.

Новизна результатов диссертационной работы

К наиболее важным и новым результатам работы можно отнести следующее:

1. Предложены и экспериментально реализованы схемы моделирования откольной повреждаемости, возникающей при кавитационном и эрозионном воздействии, при ударно-волновом нагружении с помощью метания пластины-ударника (υ_0 = 1500-2400 м/с, P = 18-32 ГПа) и обжатия скользящей детонационной волной (υ = 1170-1290 м/с, P = 1,9-3,5 ГПа).

2. Впервые исследовано влияние геометрии свободных поверхностей на характер откольного разрушения бронз. Установлено, что в сплошных цилиндрических образцах при обжатии скользящей детонационной волной не формируется развитая откольная повреждаемость, а наличие центрального сквозного отверстия приводит к формированию кольцевых откольных трещин, распространяющихся параллельно внешней и внутренней границам.

3. Установлены закономерности деформационного упрочнения исследуемых материалов. Показано, что средняя микротвердость бронз после метания пластины-ударника возрастает на 56-64 % (до 296-297 HV), а после обжатия детонационной волной: для БрАЖ9-4 – на 33 % (до 253 HV), для БрАМц9-2 – на 47 % (до 264 HV), для стали 08Х18Н10Т – на 25-30 % (до 400-420 HV).

4. 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 %.

5. Установлено, что при обжатии скользящей детонационной волной полых цилиндров из стали 08Х18Н10Т с размещённой в полости спрессованной смесью Ni-Al в сечениях, удалённых от компакта на расстояние до 5 мм, происходит практически полное схлопывание полости. Увеличение длительности

импульсного нагружения (на 10 %) 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.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы

Теоретическая значимость работы заключается в развитии представлений о волновых механизмах откольного разрушения в цилиндрических образцах при сложных схемах нагружения, в установлении взаимосвязи между геометрией свободных поверхностей, параметрами нагружения и характером повреждаемости, а также в обосновании возможности частичного залечивания дефектов при повторном сжимающем нагружении.

Практическая значимость работы заключается в том, что установленные зависимости между параметрами нагружения (скоростью и давлением) и степенью разрушения позволяют целенаправленно реализовывать различные уровни поврежденности 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.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов проведённых исследований обеспечивается использованием аттестованных методик, взаимодополняющих современных экспериментальных методов (высокоскоростная съёмка с использованием камер «Наногейт-4БП» и «Наногейт-16БП», оптическая и сканирующая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, измерение микротвердости по Виккерсу), сопоставлением полученных данных с результатами других авторов, а также публикацией основных результатов в рецензируемых научных журналах и их апробацией на российских и международных конференциях.

Публикации и апробация

По материалам диссертации опубликовано 22 печатные работы, в том числе 9 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК и индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, и 13 тезисов в сборниках научных трудов конференций. Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях.

По диссертационной работе имеются следующие замечания

1. Вызывает сомнения достоверность изображенной на рис. 3.2 ударно-волновой картины, вероятно, соответствующей цилиндрической имплозии. В работе сходящиеся волны сжатия создавались в образце скользящей детонацией взрывчатого вещества со скоростью детонации 3150-3750 м/с. Указанные скорости детонации сравнимы с продольной скоростью звука в бронзе и меньше продольной скорости звука в стали. Это значит, что ударные волны, в обычном их понимании, в образце не формировались. В образцах из бронзы ударные волны даже если и формировались, то их форма скорее соответствует конфигурациям, описанным в работах [А.А. Дерибас, А.М. Ставер //ФГВ, 1974, т.10, № 4, с. 568-578], [Н.А. Костюков, А.М. Ставер //ФГВ, 1977, т. 13, № 1, с. 92-97], описывающих ударно-волновое сжатие цилиндрических пористых тел. То же самое можно сказать и о картине, представленной на рис. 3.1 с центрированными волнами разгрузки и веером характеристик, поскольку течение материала ударника в области 5 относительно точки 1 дозвуковое.

2. В разделе 3.6 следовало бы обосновать, почему формула (3.5), взятая из ссылки [155] используется для оценки скорости внутренней поверхности цилиндра при его схлопывании. В [155] она выведена для оценки скорости разлета цилиндрической оболочки при взрыве заряда ВВ, находящегося внутри ее. Однако, в зависимости от расположения заряда ВВ (внутри или снаружи оболочки), существенно отличается картина разлета продуктов детонации и, соответственно, длительность импульса давления, разгоняющего оболочку. Поэтому использование формулы (3.5) для оценки скорости внутренней поверхности может привести к неверным результатам.

3. В разделе 2.5 на стр. 58-60 следовало бы подробнее объяснить, зачем в нижней части цилиндрической оболочки помещалась спрессованная таблетка из смеси порошков никеля и алюминия. Поскольку оболочка заполнена порошком не полностью, вряд ли это приближает эксперимент к реальным процессам взрывного компактирования, как утверждается автором.

4. В разделе 4.2 на стр. 91 применительно к нагружению цилиндров скользящей детонационной волной утверждается, что «для зарождения откольных трещин необходимо наличие внутренней свободной поверхности, от которой отражается волна разгрузки». Из этого следует, что если взять цилиндрический образец с полостью, то формирование откольного разрушения должно только облегчиться. В то же время в разделе 4.4 на стр. 101, где описывается повторное нагружение обжатием, говорится не о появлении новых трещин, а о «залечивании» старых. Непонятно, как трещины могут залечиваться при наличии растягивающих напряжений в образцах с внутренней полостью.

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости и общей положительной оценки работы, выполненной Копытским В.О.

Общая оценка диссертационной работы

Представленная диссертация выполнена на актуальную тему и является завершённой научной работой. Полученные в диссертации результаты обоснованы и достоверны, хорошо апробированы и достаточно полно опубликованы. Работа выполнена на высоком профессиональном уровне. Полученные результаты обладают научной новизной и имеют высокое фундаментальное и практическое значение. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы и отражает основные результаты.

Заключение

Диссертационная работа Копытского В.О. «Исследование откольной повреждаемости в бронзах БрАЖ9-4, БрАМц9-2 и стали 08Х18Н10Т при ударно-волновом нагружении» является научно-квалификационной работой, в которой содержатся результаты исследований, имеющие существенное значение для развития физики экстремальных состояний вещества в области, связанной с ударно-волновым нагружением и откольным разрушением конструкционных материалов.

Диссертационная работа по объёму и оригинальности полученных результатов, научной и практической значимости выводов, целям и задачам соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям п.п. 9–14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённым Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 года, а её автор, Копытский Владислав Олегович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Отзыв составлен и принят на основании анализа диссертации, автореферата и публикаций соискателя, обсуждения доклада по материалам диссертации Копытского В.О. на заседании Объединенного семинара по физике и механике высокоэнергетических процессов Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, протокол № 8 от 28.09.2026 г.

Председатель семинара
зам. директора по научной работе, к.ф.-м.н.

Юношев Александр Сергеевич

Секретарь семинара ИГиЛ СО РАН,
старший научный сотрудник лаборатории
высокоскоростных процессов, к.ф.-м.н.

Пластинин Андрей Валентинович

Главный научный сотрудник лаборатории
синтеза композиционных материалов,
д.ф.-м.н.

Штерцер Александр Александрович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН),
630090, Новосибирская обл., г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 15.
Тел.: 8 (383) 333-16-12, Факс: 8 (383) 333-16-12, E-mail: igil@hydro.nsc.ru.

Я, Юношев Александр Сергеевич даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.1.105.01 и их дальнейшую обработку.

Я, Пластинин Андрей Валентинович даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.1.105.01 и их дальнейшую обработку.

Я, Штерцер Александр Александрович даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.1.105.01 и их дальнейшую обработку.

14 октября 2026 года

Подписи А.С. Юношева, А.В. Пластинина,
А.А. Штерцера заверяю,
Зав. канцелярией

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук Для документов (ИГиЛ СО РАН) Россия г.Новосибирск

В.В. Иявойнен