

Копытский Владислав Олегович

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКОЛЬНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ
В БРОНЗАХ БРАЖ9-4, БРАМЦ9-2 И СТАЛИ 08Х18Н10Т
ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Специальность 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова
Российской академии наук (ИСМАН)

Научный руководитель	Петров Евгений Владимирович кандидат технических наук, ученый секретарь ИСМАН
Официальные оппоненты	Розен Андрей Евгеньевич доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сварочное, литейное производство и материаловедение, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Пензенский государственный университет, г. Пенза Голышев Андрей Анатольевич кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории высоких динамических давлений, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, г. Черноголовка
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Защита диссертации состоится « 02 » декабря 2026 года в 10.00 на заседании диссертационного совета 24.1.124.01 созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институте структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук (ИСМАН), по адресу: 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипяна, д.8.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСМАН и на сайте:
https://www.ism.ac.ru/n_struct/dsc/annonces/kopytskiy/kopytskiy.pdf

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью организации) просьба направлять по адресу: 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипяна д. 8, ИСМАН, Диссертационный совет 24.1.124.01. и по электронной почте petrov@ism.ac.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.т.н., профессор РАН

Бажин П.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

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 твердых частиц. Таким образом, надежность 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 позднее, 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. Поверхность изделий испытывает воздействие высокоскоростных потоков жидкости (при кавитации) или многократные соударения с твердыми частицами (при эрозии), что генерирует микросекундные ударные волны. Измерения и расчеты показывают, что при коллапсе кавитационных пузырьков у стенки пиковые давления достигают 0,5-2 ГПа, а при образовании микроструй, воздействующих на поверхность со скоростями до сотен метров в секунду, локальные давления могут превышать несколько гигапаскалей. В случае эрозии твердыми частицами давление в зоне контакта способно достигать 5–10 ГПа и более. Многократное повторение таких микроимпульсов инициирует циклическое нагружение приповерхностных объемов, накопление усталостных повреждений и, в конечном итоге, приводит к возникновению откольных разрушений в материале – внутренних разрывов, развивающихся вследствие интерференции волн разгрузки, отраженных от свободных поверхностей.

За последнее время накоплен значительный объем знаний о структурных изменениях в материалах при эрозии, однако причины, вызывающие эти изменения, и механизмы зарождения повреждений остаются не до конца раскрытыми. Существующие модели эрозии, как правило, основаны на классической механике разрушения и описывают процессы-аналоги (микрорезание, термическое циклическое разрушение), но 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: лазерной обработке, воздействии контактного заряда взрывчатых веществ, ударе водяной струи и др. В работах Буравовой С.Н. это явление получило название эффекта «ужаления», однако его природа долгое время оставалась необъясненной. Обнаружение пор и пустот, локализованных на дне впадин рельефа и распространяющихся вглубь материала в виде микротрещин, также является примером продольной повреждаемости, характерной для откольных процессов. Идентичность морфологии повреждений при высокоскоростных и низкоскоростных нагрузках свидетельствует о том, что волновой подход к описанию эрозионного разрушения является физически обоснованным и перспективным.

Откольная повреждаемость является не только механизмом эрозии, но и универсальным видом динамического разрушения, возникающего при многих видах импульсного нагружения: высокоскоростном соударении, импульсном лазерном воздействии, взрывных и ударно-волновых

процессах. В частности, откольная модель лежит в основе понимания процессов взрывного компактирования порошковых материалов, где скользящая детонационная волна обжимает тонкостенный контейнер с порошком, генерируя сходящуюся ударную волну. Управляя условиями нагружения, можно как способствовать возникновению откольных трещин, так и минимизировать разрушение конструкции. Наличие внутренней полости и её границы формирует сложную волновую картину. 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.

Степень разработанности темы исследования

Существенный вклад в изучение откольного разрушения и поведения материалов при ударно-волновом нагружении внесли советские и российские исследователи: Буракова С.Н., Канель Г.И., Разоренов С.В., Атрошенко С.А., Бондарь М.П., а также Зельдович В.И., Хомская И.В., Игнатова О.Н., Огородников В.А, Козлов Е.А. Среди зарубежных исследователей проводили анализ по данной тематике Meyers M., Nemat-Nasser S., Grady D., Fensin S., Kumar M., Bonora N. Большинство опубликованных работ посвящено изучению откольной прочности и структурных изменений в металлах и сплавах при плоских ударных волнах, генерируемых метанием пластины. Вопросы же влияния геометрии образца (наличие отверстий, полостей) и сложных схем нагружения (скользящая детонационная волна, повторное нагружение) на зарождение, развитие и возможное залечивание откольных трещин остаются малоизученными. В особенности это касается алюминиевых бронз БрАЖ9-4 и БрАМц9-2, для которых системные данные о поведении при динамических нагрузках практически отсутствуют.

В связи с этим, представляет интерес исследование закономерностей образования откольной повреждаемости в указанных материалах при различных методах ударно-волнового нагружения, включая обжатие скользящей детонационной волной и повторное нагружение, а также установление влияния геометрии свободных поверхностей и длительности импульсного воздействия на характер разрушения.

Целью работы является исследование особенностей процессов и установление закономерностей образования откольной повреждаемости в алюминиевых бронзах БрАЖ9-4, БрАМц9-2 и коррозионно-стойкой стали 08Х18Н10Т при ударно-волновом нагружении методами метания пластины-ударника и обжатия скользящей детонационной волной.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Провести оценку параметров ударно-волнового нагружения и установить закономерности формирования и развития откольных повреждений.
2. Исследовать влияние геометрии свободных поверхностей в цилиндрических образцах на образование и развитие откольных повреждений.
3. Оценить степень деформационного упрочнения образцов после нагружения методами метания пластиной-ударником и обжатия скользящей детонационной волной.
4. Установить закономерности изменения структуры, а также механических свойств бронз БрАЖ9-4, БрАМц9-2 и стали 08Х18Н10Т в зависимости от параметров и методов ударно-волнового нагружения (метание пластины-ударника, обжатие скользящей детонационной волной).
5. Определить влияние длительности импульсного нагружения, а также повторного нагружения на эволюцию откольной повреждаемости.

Научная новизна работы

1. Предложены и экспериментально реализованы схемы моделирования откольной повреждаемости, возникающей при кавитационном и эрозионном воздействии, при ударно-волновом нагружении с помощью метания пластины-ударника ($v_0 = 1500-2400$ м/с, $P = 18-32$ ГПа) и обжатия скользящей детонационной волной ($v = 1170-1290$ м/с, $P = 1,9-3,5$ ГПа), которые

позволяют воспроизводить характерные виды повреждения: осевые и радиальные трещины, поры, полосы локализованной деформации в контролируемых условиях за одно импульсное нагружение.

2. Впервые исследовано влияние геометрии свободных поверхностей на характер откольного разрушения образцов бронз и установлено, что в сплошных цилиндрических образцах при обжати скользящей детонационной волной не формируется развитая откольная повреждаемость вследствие отсутствия внутренней свободной поверхности, а наличие центрального сквозного отверстия, моделирующего магистральную осевую откольную трещину, создает дополнительную внутреннюю свободную поверхность, что приводит к формированию кольцевых откольных трещин, распространяющихся параллельно внешней и внутренней границам.

3. Установлены закономерности деформационного упрочнения исследуемых материалов при ударно-волновом нагружении, которые показали, что средняя микротвердость после метания пластины-ударника для бронз БрАЖ9-4 и БрАМц9-2 возрастает на 56 и 64 % (до 296 HV), а после обжатия детонационной волной: для бронзы БрАЖ9-4 – на 33 % (до 253 HV), для бронзы БрАМц9-2 – на 47 % (до 264 HV), для стали 08X18H10T – на 25-30 % (до 400-420 HV).

4. Установлено, что при обжати скользящей детонационной волной полых цилиндров из стали 08X18H10T с размещенной в их полости спрессованной порошковой смеси Ni-Al в сечениях, удаленных от компакта на расстояние до 5 мм, происходит практически полное схлопывание полости и впервые показано, что 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.

Практическая значимость работы

1. Установлены зависимости между параметрами нагружения (скоростью и давлением) и степенью разрушения, а также развитостью деформационной структуры в исследуемых материалах и показано, что изменение: давления с 3,5 до 1,9 ГПа, скорости соударения 1500-2400 м/с и схемы нагружения позволяет целенаправленно реализовывать различные уровни поврежденности (от единичных микропор до развитой сети магистральных трещин) и контролировать формирование дефектной структуры.

2. Установлены закономерности изменения структуры и механических свойств алюминиевых бронз БрАЖ9-4, БрАМц9-2 и стали 08X18H10T в зависимости от методов и параметров ударно-волнового нагружения (скорости и давления). Показано, что характер разрушения определяется фазовым строением материалов: для бронз – наличием эвтектидной составляющей (БрАЖ9-4) или пластичной α -матрицы (БрАМц9-2); для стали – аустенитной структурой, обеспечивающей высокую пластичность и сопротивление откольному разрушению при динамическом нагружении.

3. Установлено, что увеличение длительности импульса (на 10 %) при обжати полых стальных цилиндров с преградой Ni-Al снижает повреждаемость наружной поверхности, что позволяет целенаправленно управлять режимами взрывного компактирования для получения цельных изделий без дефектов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Закономерности влияния параметров и методов ударно-волнового нагружения образцов на образование откольной повреждаемости в зависимости от структуры и механических свойств исследованных материалов.

2. Влияние геометрии образцов и их свободных поверхностей на область образования откольных трещин.

3. Результаты деформационного упрочнения образцов в зависимости от методов нагружения и их химического состава.

4. Результаты исследования схлопывания цилиндрических стальных образцов с компактом порошковой смеси Ni-Al и влияние длительности импульса нагружения на образование повреждаемости.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности, по которой она рекомендуется к защите

Диссертационная работа «Исследование откольной повреждаемости в бронзах БрАЖ9-4, БрАМц9-2 и стали 08Х18Н10Т при ударно-волновом нагружении» соответствует паспорту научной специальности: 1.3.17 – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» (отрасль науки – технические), в частности направлениям исследований:

✓ пункт 1 «Поведение веществ и структурно-фазовые переходы в экстремальных условиях – ... в условиях статического и динамического сжатия, ...»;

✓ пункт 4 «Закономерности и механизмы распространения, структура, параметры и устойчивость волн ... детонации, взрывных и ударных волн; связь химической и физической природы веществ и систем с их ... характеристиками ... взрывчатого превращения; ... макрокинетика процессов ... взрывчатого превращения»;

✓ пункт 5 «Процессы аналоги ... детонации и взрыва; взаимодействие волн ... взрывчатого превращения со средой, объектами и веществами; явления, порождаемые ... взрывчатым превращением; процессы ... взрывчатого превращения в устройствах и аппаратах для ... получения веществ и продуктов; управление процессами ... взрывчатого превращения».

Апробация работы

Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: VII, VIII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии», 2021, 2022, г. Москва; XXXIII Симпозиум «Современная химическая физика», 2021, г. Туапсе; Международная конференция «Физика и технологии перспективных материалов-2021», 2021, г. Уфа; XVIII, XIX, XX Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов», 2021, 2022, 2023, г. Москва; IV International Conference and School of Young Scientists "Advanced High Entropy Materials", 2022, г. Черногловка; III Международная конференция «Физика конденсированных состояний», 2023, г. Черногловка; 21-я Международная школа-конференция им. Б.А. Калина для молодых ученых и специалистов, 2023, г. Москва; XV Международная научно-инновационная молодежная конференция «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент», 2023, г. Тамбов; XVI International Symposium on Self-propagating High-temperature Synthesis, 2024, г. Ереван; XV Конференция молодых ученых по общей и неорганической химии, 2025, г. Москва.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертационной работы опубликовано 22 печатные работы, в том числе 9 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК и базы данных Web of Science и Scopus, и 13 тезисов в сборниках научных трудов перечисленных выше конференций.

Личный вклад автора

Автором выполнен анализ литературных данных по теме диссертации, совместно с научным руководителем сформулированы цель и задачи работы. Соискателем лично и при непосредственном участии: подготовлены и проведены эксперименты по ударно-волновому нагружению образцов из бронз БрАЖ9-4, БрАМц9-2 и стали 08Х18Н10Т методами метания пластины-ударника и обжатия скользящей детонационной волной, было исследовано влияние геометрии свободных поверхностей на характер откольного разрушения бронз, установлены закономерности деформационного упрочнения исследуемых материалов после ударно-волнового нагружения, установлены закономерности изменения структуры и механических свойств бронз

БрАЖ9-4, БрАМц9-2 и стали 08Х18Н10Т. Автор принимал участие в формулировке основных положений диссертации, написании статей и результатов работы, представленных на российских и международных конференциях.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов исследований подтверждается достаточным объёмом проведённых измерений образцов из бронз БрАЖ9-4, БрАМц9-2 и стали 08Х18Н10Т после ударно-волнового нагружения, с использованием взаимодополняющих аттестованных методик (высокоскоростная съёмка, оптическая и сканирующая электронная микроскопия, 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.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа содержит введение, 5 глав, выводы, список использованных источников. Общий объем работы составляет 148 страниц, включая 45 рисунков, 6 таблиц и библиографию из 169 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлены цель и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость работы, изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор современных литературных данных об алюминиевых бронзах марок БрАЖ9-4 и БрАМц9-2, аустенитной коррозионно-стойкой стали 08Х18Н10Т, а также основных областях их применения. Рассмотрены методы ударно-волнового нагружения: взрывное нагружение, ударное нагружение соударением с твердым телом, а также взрывное компактирование порошков. Проанализированы деформационные процессы, протекающие в материалах при ударно-волновом нагружении. Выполнен обзор явления кавитационной эрозии, включая основные типы кавитационностойких сплавов, факторы, влияющие на кавитационную стойкость, методы ее оценки и анализа результатов испытаний. Рассмотрены механизмы и модели откольной повреждаемости, представляющей собой внутреннее разрушение материала, вызванное динамическими растягивающими напряжениями, возникающими в результате интерференции волн разгрузки, отраженных от свободных поверхностей.

Проведенный анализ литературных данных позволил сформулировать цель и задачи настоящего диссертационного исследования и установил, что закономерности образования откольной повреждаемости в алюминиевых бронзах БрАЖ9-4, БрАМц9-2 и коррозионно-стойкой стали 08Х18Н10Т при различных методах ударно-волнового нагружения (метание пластины-ударника и обжатие скользящей детонационной волной), а также влияние геометрии образцов и длительности импульсного воздействия на характер разрушения остаются недостаточно изученными. В связи с этим необходимо проведение комплексного исследования структурно-фазовых изменений, деформационного упрочнения и возможности залечивания откольных дефектов в указанных материалах при первичном и повторном нагружении.

Во второй главе описаны использованные в работе материалы, изложена методика проведения экспериментов и подготовки материалов, приведено описание установок для проведения экспериментов и методов анализа образцов, полученных в ходе экспериментов.

Для проведения экспериментов по ударно-волновому нагружению бронзы были использованы цилиндрические образцы из сплавов марок БрАЖ9-4 и БрАМц9-2 размером: диаметр 25 мм, высота 40 мм. В образцах для создания дополнительных свободных поверхностей изготовлялось сквозное отверстие диаметром 8 мм. В качестве взрывчатого вещества (ВВ)

использовался аммонит 6ЖВ насыпной плотности 1 г/см^3 со скоростью детонации 3,6-4,8 км/с. Эксперименты по ударно-волновому нагружению материалов проводились по двум схемам: метание пластины-ударника (рис. 1а) и обжатие скользящей детонационной волной (рис. 1б).

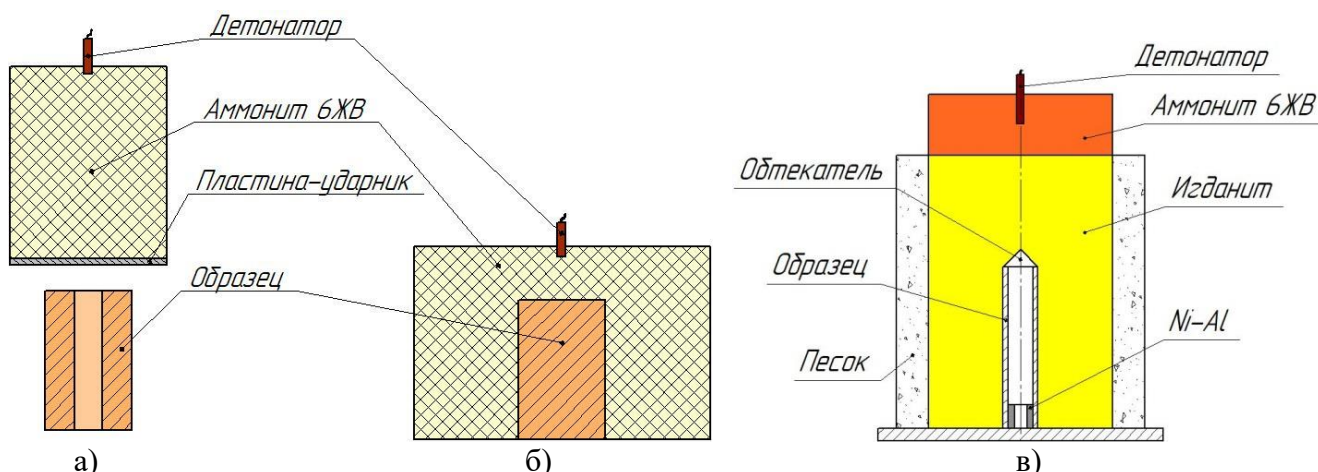


Рисунок 1 – Схемы экспериментов: а) метание пластины ударника на бронзовые полые образцы; б) обжатие скользящей детонационной волной бронзовых образцов; в) обжатие скользящей детонационной волной стальных образцов

Для исследования образования откольной повреждаемости в стали (рис. 1в) были использованы полые цилиндрические образцы из коррозионностойкой стали 08X18H10T со следующими параметрами: толщина стенки 2 мм, диаметр отверстия 10 мм, высота образца 65-70 мм. В качестве ВВ использовались аммонит 6ЖВ и игданит. Спрессованная таблетка из порошковой смеси Ni-Al диаметром 10 мм и высотой 10 мм помещалась в нижнюю часть цилиндра, в качестве преграды. Эта порошковая смесь состояла из никелевого порошка ПНК-УТЗ ($d \sim 18 \text{ мкм}$) и алюминиевого порошка АСД-1 ($d \sim 20 \text{ мкм}$) в эквимольном соотношении. Ударная волна, возникающая при детонации в верхней части цилиндра, оказывала давление скользящей детонационной волной на цилиндрическую оболочку, вызывая сжатие образца. Диаметр заряда ВВ составлял 70 мм в первом эксперименте и 116 мм во втором. Для увеличения импульсной нагрузки образец вместе с ВВ помещался под 17-миллиметровый слой песка. Дополнительный слой из песка позволяет создать более равномерное распределение давления за счет уменьшения рассеивания энергии взрыва.

В третьей главе изложены теоретические основы откольной повреждаемости и выполнены оценки параметров ударно-волнового нагружения. Рассмотрены волновые картины для двух схем ударно-волнового нагружения: соударения пластины-ударника с образцом и обжатия цилиндров скользящей детонационной волной.

При нагружении метанием пластины-ударника важным является случай, когда диаметр ударника превышает диаметр образца (или ударник имеет удлиненную форму). В момент удара одновременно с ударными волнами возникает центрированная волна разгрузки, отраженная от границы контактной поверхности, что приводит к искривлению фронта ударной волны и снижению ее амплитуды. Фокусировка боковых волн разгрузки на оси симметрии образца создает зону высоких растягивающих напряжений, инициирующих иглоподобную осевую откольную трещину (рис. 2а). При последующем торможении ударника формируются импульсы сжатия, которые, взаимодействуя с уже существующей трещиной, приводят к образованию кольцевых откольных трещин или полос локализованной деформации (ПЛД), ограничивающих цилиндрический объем материала («пробку»).

При обжатии скользящей детонационной волной цилиндрических образцов реализуются условия, близкие к цилиндрической кумуляции. Теоретически предсказывается неограниченный рост давления на оси, однако на практике из-за развития неустойчивостей на фронте ударной волны возникают тройные ударные конфигурации – выступы (Маховские конфигурации), которые растут и делят фронт на отдельные сектора. При столкновении встречных выступов формируются «пластические струи», что завершает процесс кумуляции. Схема перемещения тройных конфигураций показана на схеме (рис. 2б).

В образцах конечных размеров многократное отражение волн от границ приводит к установлению стоячих волн и возникновению обертонов (гармоник). В узлах этих гармоник – зонах интерференции волн разгрузки – формируются закономерные расположенные системы откольных повреждений. При выходе возмущенной ударной волны на свободную поверхность (например, внутреннюю полость) образуется волнистый рельеф – складки. Каждая складка становится источником волны разгрузки; интерференция волн от соседних складок создает растягивающие напряжения, приводящие к радиальным откольным трещинам. При недостаточной амплитуде растяжения трещины «залечиваются», трансформируясь в ПЛД.

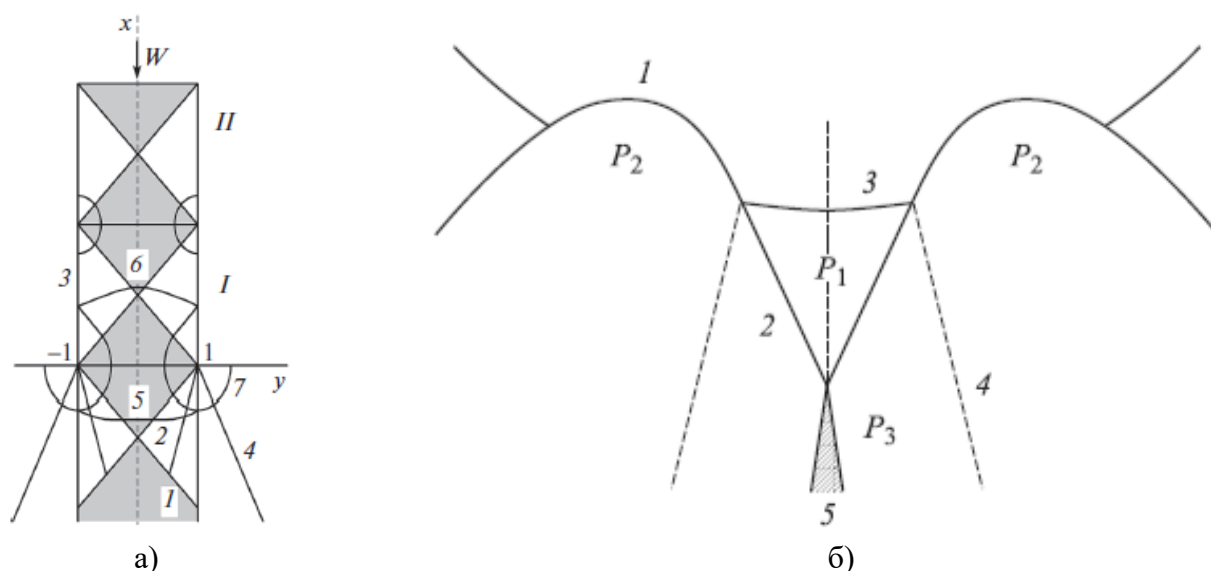


Рисунок 2 – Схема волновой картины импульсного взаимодействия твердых тел при соударении (а) 1 – траектория точки пересечения головной характеристики центрированной волны разгрузки (траектория s_0) с фронтом ударной волны; 2 – промежуточная траектория s ; 3 – траектория точки пересечения фронта ударной волны с характеристикой, направленной вдоль боковой грани ударника; 4 – траектория точки пересечения фронта ударной волны с характеристикой s_n , где N – динамический предел текучести Гюгонио; 5 – участок невозмущенного фронта ударной волны в преграде; 6 – участок фронта ударной волны, в зоне торможения; 7 – область боковой разгрузки; W – скорость набегающего на фронт ударной волны потока, равная скорости удара; I – первый пространственный цикл; II – второй пространственный цикл (серым цветом обозначена область, где амплитуда ударной волны сохраняет первоначальное значение) и схема перемещения тройных конфигураций по фронту ударной волны при обжатии (б) 1 – косая ударная волна, 2 – продольная ударная волна, 3 – фронт ударной волны, 4 – тангенциальный разрыв, 5 – область столкновения поперечных волн; P_1 – давление несущей ударной волны, P_2 – давление за косой ударной волной, P_3 – давление в области высокого давления под фронтом ударной волны

Оценка параметров ударно-волнового нагружения, как теоретическая, так и экспериментальная, необходима для установления взаимосвязи структурных изменений и параметров нагружения. Вначале была проведена экспериментальная оценка скорости метания пластины-ударника с помощью высокоскоростной съемки.

Средняя скорость полета пластины-ударника, рассчитанная по полученным кадрам, составляет 1,5 км/с. Также был проведен оценочный расчет скорости метания пластины-ударника и давления соударения с образцом.

Для определения скорости метания пластины-ударника, использовалась формула Гарни:

$$V = \sqrt{2E_G} \frac{r\sqrt{3}}{\sqrt{r^2 + 5r + 4}} \quad (1)$$

где: r – отношение массы ВВ к массе метаемой пластины; величина E_G называется энергией Гарни и представляет собой часть энергии Q – теплоты взрыва, переходящей в кинетическую энергию продуктов взрыва.

Значения энергии Гарни известны для различных типов ВВ, для аммонита 6ЖВ: $\sqrt{2E_G} = 1,83$ км/с. Рассчитанная скорость по формуле (1) $V = 2,4$ км/с, это максимальная скорость, которая может быть достигнута до столкновения пластины с образцом. Зная величину скорости метания пластины-ударника, можно определить испытываемое образцом давление при соударении.

Для оценки давления при соударении пластины-ударника с бронзовым образцом использован метод ударных адиабат.

Ударные адиабаты материалов описываются в линейной форме:

$$D = C_0 + bu \quad (2)$$

где D – скорость ударной волны; u – массовая скорость за фронтом; C_0 – скорость звука в материале при нулевом давлении, b – эмпирический коэффициент, зависящий от материала. Давление на фронте ударной волны определяется соотношением:

$$P = \rho_0 D u \quad (3)$$

где: ρ_0 – плотность материала преграды при нулевом давлении.

На контактной границе выполняются условия равенства давлений и непрерывности массовой скорости:

$$P_1 = P_2 = P, \quad u_1 + u_2 = u_0 \quad (4)$$

где u_0 – скорость соударения, индексы 1 и 2 относятся к материалу пластины и преграды соответственно. Система уравнений (2)-(4) решается итерационно.

Значение давления соударения пластины-ударника с бронзовым образцом, рассчитанное по формулам (2)-(4), составляет порядка 32 ГПа при максимально возможной скорости соударения, а при средней полученной экспериментально скорости (1,5 км/с) давление будет 18 ГПа. В любом случае, данное давление в несколько раз превышает откольную прочность бронзы (3,5 ГПа), что объясняет образование откольных трещин в образцах как сплошного, так и полого строения.

Для полых бронзовых и стальных цилиндров рассчитаны параметры обжатия: скорость сжатия стенок и давление. Для оценки скорости внутренней поверхности цилиндра или массовой скорости металла, проведен расчет по формуле, которая выводится из закона сохранения энергии:

$$v = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{r}{2(1 + \frac{2r}{\psi})}} \quad (5)$$

где: v – массовая скорость металла в радиальном направлении (м/с); D – скорость детонации ВВ (м/с); r – отношение массы ВВ к массе металла; ψ – геометрический коэффициент. Коэффициент $\psi = 4$ (для цилиндров) следует из соотношения площадей и геометрии разлета продуктов детонации.

Рассчитанная по формуле (5) скорость для бронзовых образцов $v = 1220$ м/с, для стальных образцов $v = 1290$ м/с в случае нагружения зарядом ВВ диаметром 70 мм (образец №1), и $v = 1170$ м/с в случае нагружения зарядом ВВ диаметром 116 мм (образец №2).

Для оценки давления в скользящей детонационной волне (давление Чепмена-Жуге), была использована формула:

$$P = \frac{\rho \cdot D^2}{4} \quad (6)$$

где: ρ – плотность ВВ (кг/м³); D – скорость детонации ВВ (м/с).

Рассчитанное по формуле (6) давление для бронзовых образцов в случае нагружения зарядом со скоростью детонации $D = 3400$ м/с, $P = 2,9$ ГПа, а в случае нагружения зарядом со скоростью 3700 м/с, $P = 3,4$ ГПа. Сопоставление этих параметров с наблюдаемой повреждаемостью позволяет установить закономерности разрушения.

Четвертая глава посвящена исследованию образования откольной повреждаемости в бронзе после ударно-волнового нагружения. Вначале было проведено исследование ударно-волнового нагружения образцов методом метания пластины-ударника, после чего были изготовлены продольные шлифы для дальнейших металлографических исследований. При ударе пластиной находящиеся в обойме образцы не изменили свою форму и приобрели малое количество видимых дефектов. При ударе алюминиевой пластиной-ударником по образцам бронзы без обоймы цилиндры деформируются на поверхности соударения, приобретая «грибовидную» форму. Во всех образцах наблюдается образование откольных трещин и большого количества микропор (рис. 3).

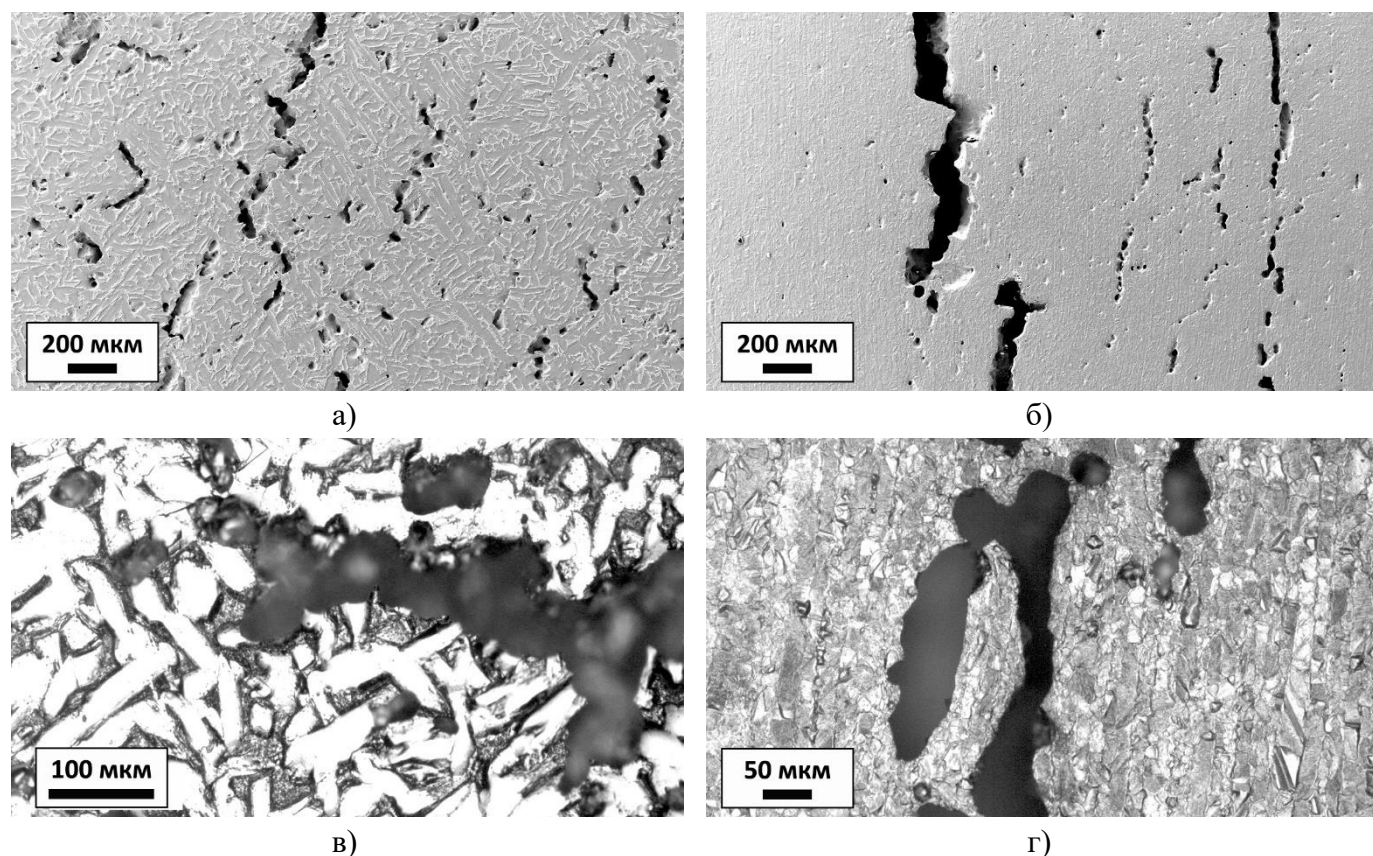


Рисунок 3 – Микрофотографии травленной структуры бронзы после соударения с пластиной-ударником: в обойме (а) БрАЖ9-4, (б) БрАМц9-2; без обоймы (в) БрАЖ9-4, (г) БрАМц9-2

Напряжения, вызванные воздействием ударной волны в материале, в несколько раз превышают динамическую прочность материала бронзы, и в местах образовавшихся трещин можно также увидеть образовавшиеся из-за них микропоры, размеры которых составляют от 10 до 100 мкм. Такие зародышевые микропоры, по сути, являются будущими очагами разрушения, из-за которых образуются продольные откольные трещины при нагружении ударными волнами. В бронзе БрАЖ9-4 развитие повреждаемости начинается с образования пор в более хрупком

эвтектоиде, содержащем Fe-Al включения, что придает откольным трещинам извилистый характер при их распространении. Для БрАМц9-2 разрушение происходит на фоне обширной пластической деформации α -фазы, где трещина формируется лишь после исчерпания ресурса пластичности материала. В отличие от извилистых трещин в БрАЖ9-4, трещины в БрАМц9-2, обусловленные анизотропией структуры, приобретенной при волочении, имеют преимущественно прямолинейный характер.

В микроструктуре БрАЖ9-4 прослеживается формирование небольших участков с полосами скольжения дислокаций внутри зерен (рис. 4а), причем полосы имеют преимущественно прямолинейный характер и наблюдаются лишь в отдельных зернах, локализованных в зонах откольной повреждаемости. Микроструктура БрАМц9-2 отличается значительно большим количеством образовавшихся полос (рис. 4б), которые присутствуют практически во всех зернах и имеют извилистую конфигурацию, что свидетельствует о развитии скольжения по нескольким системам. Характер деформационной структуры подтверждает, что высокоскоростная пластическая деформация бронзы осуществляется дислокационным скольжением, причем наличие в структуре грубых следов скольжения указывает на повышенную локализацию пластической деформации, более выраженную в БрАМц9-2.

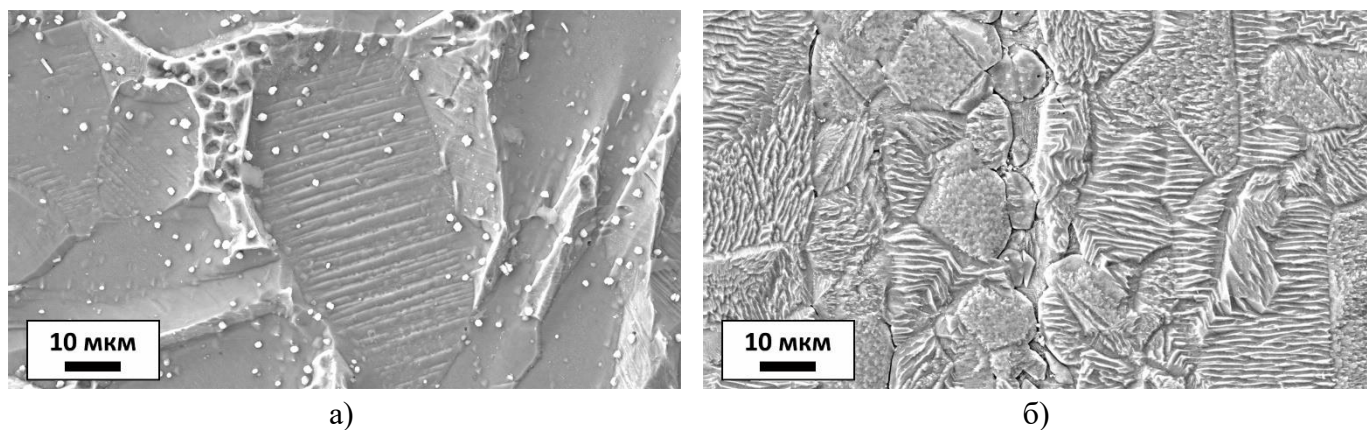


Рисунок 4 – Полосы скольжения в зернах α -фазы бронзы (а) БрАЖ9-4, (б) БрАМц9-2

Образовавшиеся дефекты приводят к изменению твердости материала, для оценки степени изменения которой были проведены измерения микротвердости данных образцов. По результатам измерений микротвердости, выполненных по глубине (на расстоянии 2-18 мм от поверхности соударения) и по ширине образцов, установлены количественные закономерности деформационного упрочнения. Наибольшие значения микротвердости зафиксированы на глубине 2 мм непосредственно у поверхности соударения, где амплитуда ударной волны максимальна; по мере удаления от поверхности значения микротвердости снижаются, достигая минимума на глубине 18 мм. Средняя микротвердость бронзы БрАЖ9-4 после нагружения в обойме возрастает с исходных 190 HV до 266 HV (прирост 40 %), без обоймы – до 297 HV (прирост 56 %). Для бронзы БрАМц9-2 исходная микротвердость 180 HV повышается до 283 HV в обойме (прирост 57 %) и до 296 HV без обоймы (прирост 64 %). Таким образом, отсутствие обоймы, обуславливающее дополнительную пластическую деформацию при радиальном растекании материала, увеличивает среднюю степень упрочнения на 10-15 % по сравнению с образцами, нагруженными в обойме. Различия в характере упрочнения бронз разных марок обусловлены их исходным фазовым составом и структурой. БрАМц9-2 обладает более пластичной однородной α -матрицей, что обеспечивает равномерное распределение деформации и, как следствие, равномерное упрочнение по всему объему материала. Напротив, БрАЖ9-4 содержит хрупкие эвтектоидные участки с включениями Fe-Al, которые служат концентраторами напряжений и способствуют локализации пластической деформации. В результате упрочнение БрАЖ9-4 носит

неравномерный характер с выраженными локальными пиками, однако общий ресурс деформационного упрочнения у нее выше благодаря исходно менее деформированной структуре (горячее прессование).

Было проведено исследование образования откольной повреждаемости в бронзе методом обжатия скользящей детонационной волной. Из образцов были также изготовлены продольные шлифы для дальнейших металлографических исследований. Вне зависимости от величины заряда (290 и 490 г) на шлифах образцов не было обнаружено каких-либо трещин. Нагружение образцов ударными волнами с разных сторон и разной величиной напряжений не привели к образованию множественных откольных трещин. Ударные волны, проходящие через сплошной цилиндрический образец, распространяются навстречу друг другу, однако ввиду отсутствия свободных поверхностей не формируются волны разгрузки и, следовательно, не возникают растягивающие напряжения, необходимые для откольного разрушения. Преимущественно фиксируется только наличие микропор, а также небольших микроразрывов вдоль границ зерен (рис. 5). Таким образом, в отличие от метания пластины-ударника, где реализуется развитая сеть откольных трещин, обжатие позволяет зафиксировать начальную стадию развития разрушения. При этом в бронзе БрАЖ9-4 полосы скольжения в α -зернах отсутствуют, а повреждаемость инициируется преимущественно микропорами в эвтектоидных участках, содержащих Fe-Al включения, которые являются более хрупкой фазой. В бронзе БрАМц9-2, напротив, в α -зернах наблюдаются единичные прямые полосы скольжения, что указывает на начало пластической деформации матрицы как предвестник разрушения.

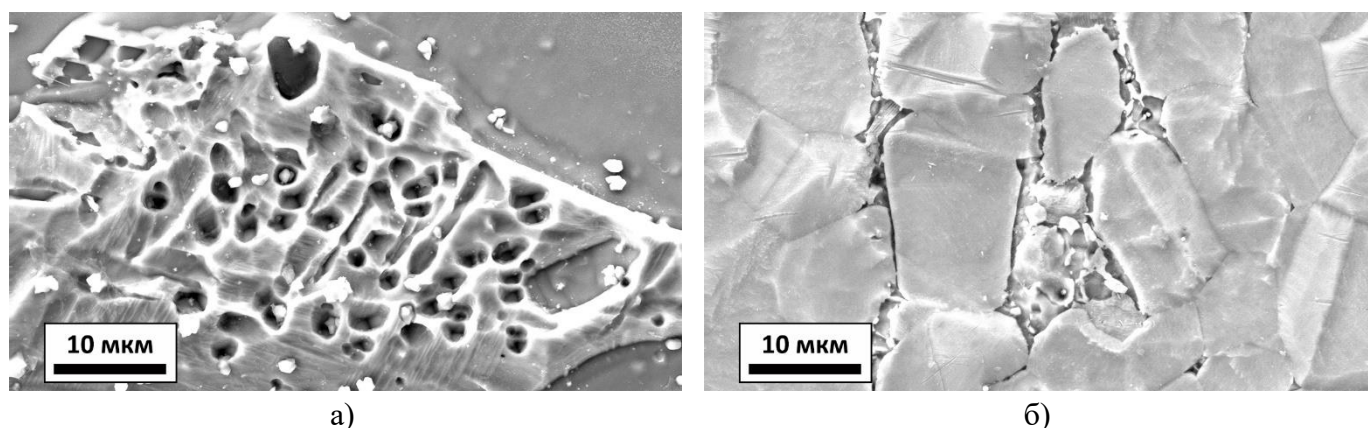


Рисунок 5 – Микрофотографии травленной структуры бронзы после обжатия скользящей детонационной волной: а) БрАЖ9-4; б) БрАМц9-2

Результаты измерений микротвердости показали отсутствие разницы в изменении микротвердости в результате удаления от верхней поверхности. Однако, твердость по ширине образца отражает картину образовавшихся зон с дефектами на исследуемой поверхности. Значительный прирост упрочнения происходит преимущественно ближе к боковым граням образца, где располагалась большая часть заряда ВВ. По сравнению с микротвердостью в исходном состоянии ее значение после обжатия в бронзах БрАЖ9-4 и БрАМц9-2 увеличилось на 33 % и 39-47 %, соответственно.

Другая серия экспериментов была проведена для исследования образования откольной повреждаемости в бронзовых образцах с отверстием методом метания пластины-ударника и последующего повторного нагружения методом обжатия скользящей детонационной волной. Все параметры и схема нагружения оставались идентичными. Из образцов были изготовлены поперечные шлифы для дальнейших металлографических исследований. На рисунке 6 представлены поверхности соударения с пластиной-ударником и параллельные им поверхности шлифов.

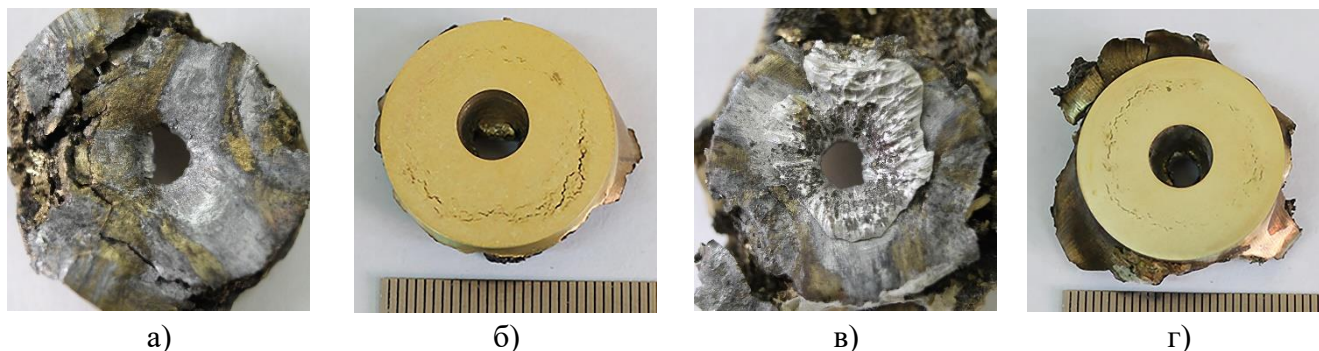


Рисунок 5 – Фотографии образцов БрАЖ9-4 (а, б) и БрАМц9-2 (в, г) после нагружения:
а, в) поверхность соударения; б, г) шлиф на расстоянии 12-13 мм

На поверхности соударения можно наблюдать расплавленные остатки алюминиевой пластины-ударника, затекающие в отверстие. На стороне шлифа образуются микротрещины, которые являются продолжением отрыва слоя материала на поверхности соударения. Трещины расположены преимущественно посередине между отверстием и наружными стенками образца. Как и в предыдущих образцах, трещины распространяются вдоль оси образца, т.е. направления распространения ударных волн. Также, трещины распространяются параллельно стенкам образцов практически по всему диаметру, что говорит о том, что при наличии внутренних свободных поверхностей, отраженные волны встречаются в середине толщины образца и при достаточном уровне нагружения вызывают кольцевые откольные трещины.

По мере растяжения материала, имеющиеся, и образующиеся в нем новые поры сливаются и образуют более крупные поры (рис. 7).

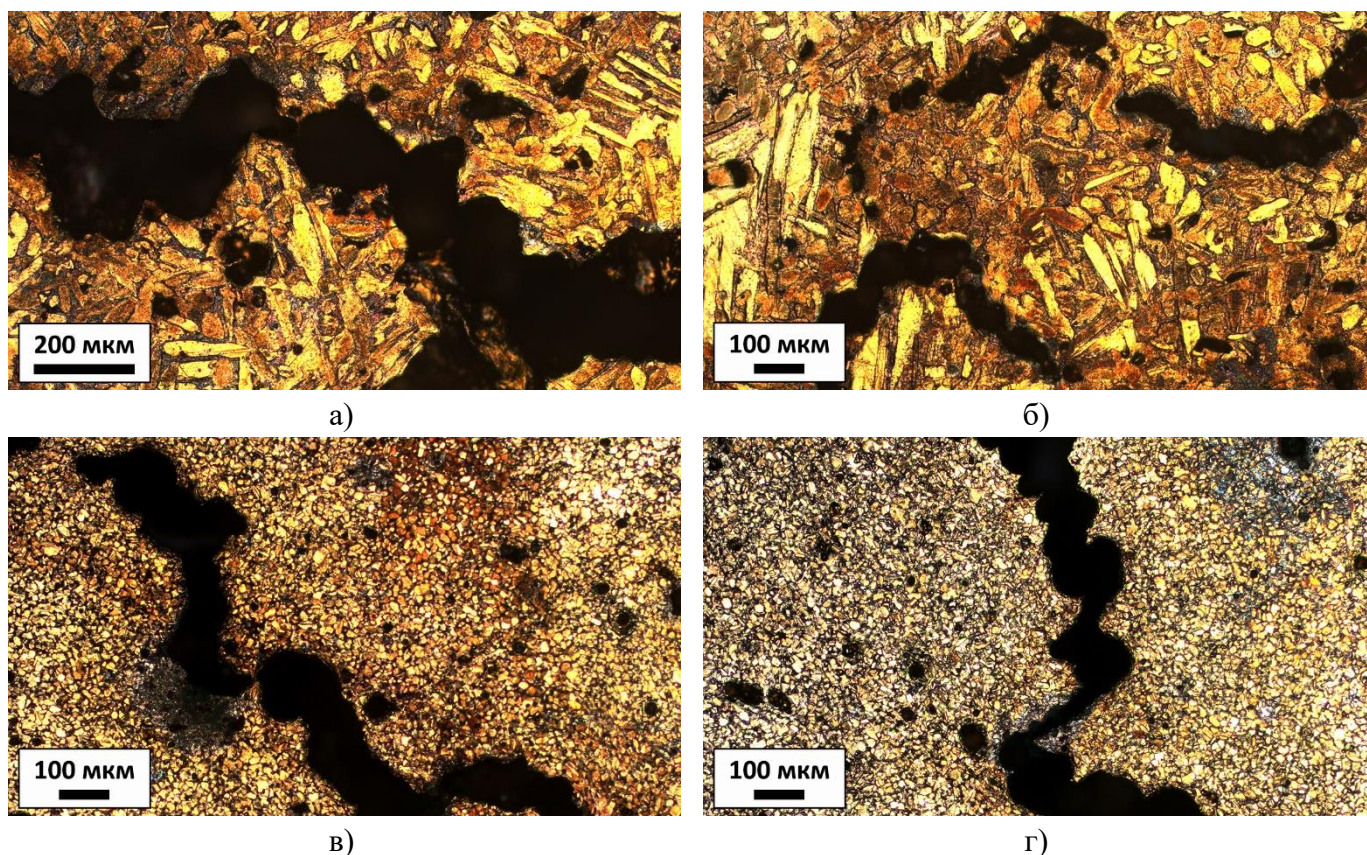
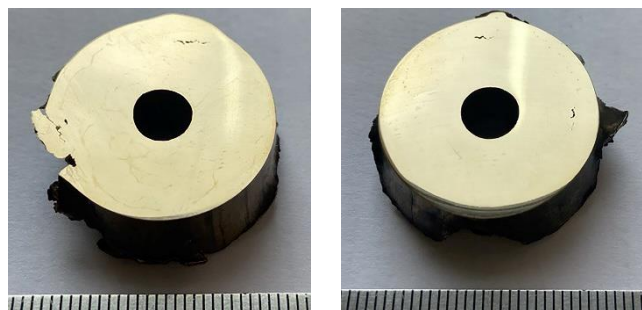


Рисунок 7 – Микрофотографии травленной структуры полых образцов бронзы после соударения с пластиной-ударником: (а, б) БрАЖ9-4; (в, г) БрАМц9-2

В итоге образуется сплошная кольцевая трещина, перпендикулярная оси образца. Дальнейший рост этой трещины происходит путем присоединения новых пор при разрыве перемычек между ними. Микроструктура бронзы БрАЖ9-4 имеет более крупные зерна по сравнению с БрАМц9-2, однако на развитие трещин и их размерность это никак не повлияло. Характер развития трещин транскристаллитный. Таким образом, определяющим фактором локализации и направления откольных трещин является геометрия свободных поверхностей (наличие центрального отверстия), тогда как структурные особенности материалов (размер зерна, фазовый состав) оказывают вторичное влияние, не изменяя общей картины разрушения.

На данных образцах с отверстием было проведено измерение микротвердости вдоль диаметра образца. Ближе к отверстию в образце наблюдается повышение микротвердости, также как и в районе откольной повреждаемости. Анализ результатов измерения показал, что микротвердость вблизи откольных трещин в 1,2-1,5 раза выше, чем в остальной менее деформированной области материала. Повышенная твердость в откольной области обусловлена деформированной структурой. Однако данные области могут служить будущими очагами разрушения из-за образования в них структуры с более высокой твердостью, чем твердость окружающего материала. Микротвердость для обоих образцов по сравнению с исходной в среднем выросла на 58 %.

Аналогичные образцы с отверстием после соударения с пластиной-ударником были повторно нагружены методом обжатия скользящей детонационной волной. Повторное нагружение обжатием позволяет рассмотреть изменение количества образовавшихся дефектов и откольных трещин в ранее нагруженном образце. После повторного нагружения на изготовленных поперечных шлифах, на аналогичном расстоянии от поверхности соударения фиксируется меньшее количество образовавшихся трещин (рис. 8). Диаметр отверстия у образцов в приповерхностных областях изменился до 4-5 мм. На плоскости шлифа, т.е. на глубине 8-10 мм диаметр отверстия равен 6 мм.



а)

б)

Рисунок 8 – Фотографии поверхности шлифов (а) БрАЖ9-4 и (б) БрАМц9-2 после повторного ударно-волнового нагружения

Расположение оставшихся трещин предположительно связано с сужением отверстия, а значит утолщением материала стенок ближе к отверстию, за счет чего откольные трещины визуально находятся ближе к наружным стенкам образцов. У присутствующих откольных трещин были обнаружены переходы в ПЛД (рис. 9). На нетравленных шлифах область ПЛД выглядит более светлой и имеет раздробленную структуру.

Измерение микротвердости по диаметру образцов показало, что повторное обжатие скользящей детонационной волной приводит к дополнительному деформационному упрочнению обоих сплавов, причем наиболее выраженный прирост фиксируется в зоне локализации кольцевых откольных трещин. Средняя микротвердость бронзы БрАЖ9-4 возрастает с 300 HV после первичного нагружения метанием пластины-ударника до 328 HV после повторного обжатия (прирост 9,3 %); в центральной части стенки, где располагались кольцевые трещины, прирост достигает 16-23 %. Для бронзы БрАМц9-2 микротвердость повышается с 284 до 310 HV (прирост 9,1 %), при этом в зоне бывших трещин прирост также максимален (17-23 %).

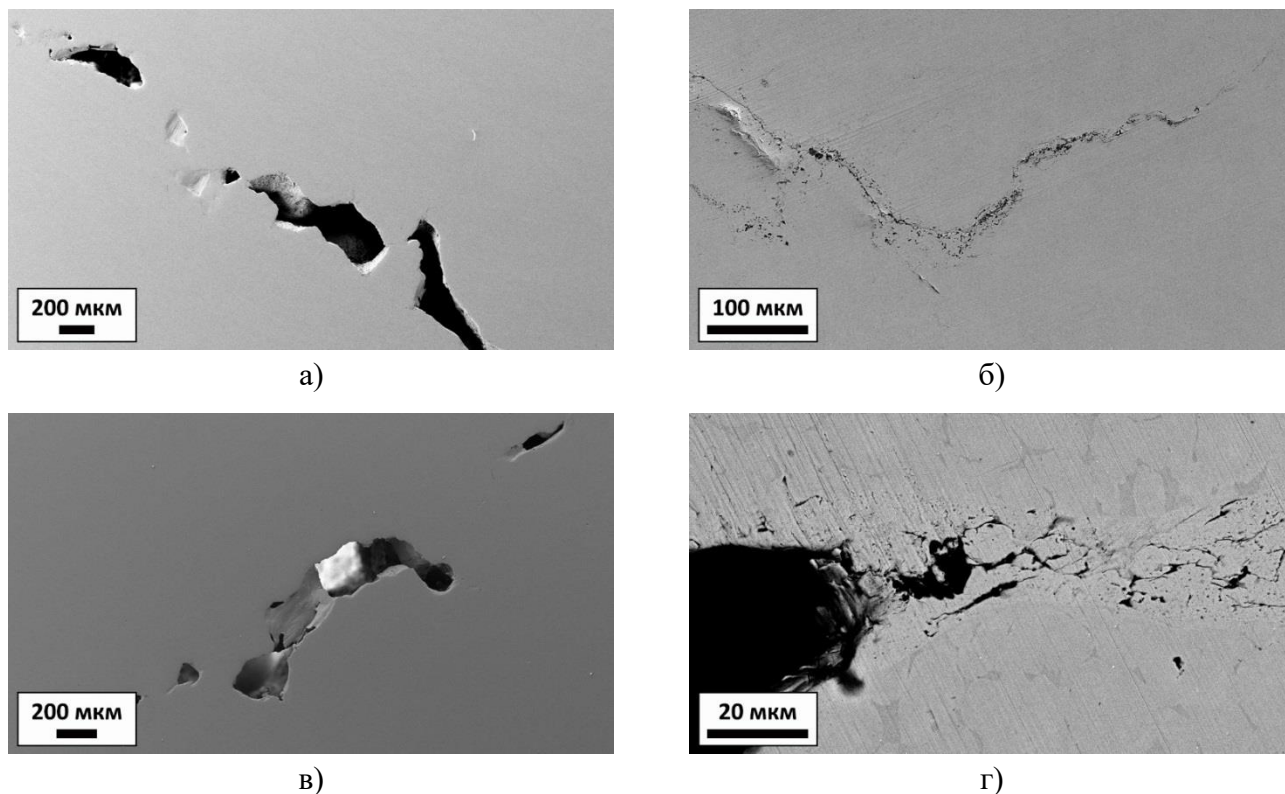
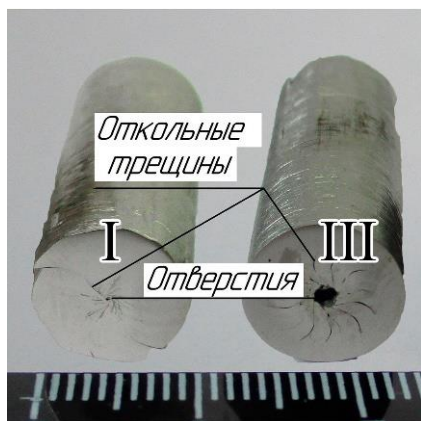


Рисунок 9 – Микрофотографии откольных трещин и полос локализованной деформации в микроструктуре бронзы после повторного ударно-волнового нагружения: (а, б) БрАЖ9-4; (в, г) БрАМц9-2

В результате меньшего количества обнаруженных откольных трещин, упрочнения материала в месте их образования и наличия ПЛД можно сделать вывод о частичном заживлении материала бронзовых образцов после соударения с пластиной-ударником при повторном ударно-волновом нагружении методом обжатия скользящей детонационной волной.

Пятая глава посвящена исследованию образования откольной повреждаемости в стали после ударно-волнового нагружения. Эксперименты проводились на полых стальных цилиндрах с расположенной внутри преградой в виде компакта порошка Ni-Al при обжатии их зарядом ВВ. Переход к полым цилиндрическим образцам из коррозионно-стойкой стали 08X18H10T с размещенным внутри компактом Ni-Al обусловлен необходимостью изучения процессов динамического деформирования и разрушения цилиндрических тонкостенных конструкций, широко применяемых в технике. Данная схема позволяет одновременно исследовать два взаимосвязанных явления: инерционное схлопывание полости под действием скользящей детонационной волны и взаимодействие оболочки с внутренней преградой (компактом). Кроме того, использование реакционной смеси Ni-Al открывает возможность изучения влияния экзотермического синтеза интерметаллидов на повреждаемость материала в условиях импульсного нагружения. Общий вид обжатых образцов представлен на рисунке 10. Стоит отметить наличие откольных трещин у образца 1 с их выходом на наружную поверхность у верхней части цилиндра (рис. 10а). На каждом образце было рассмотрено 3 поперечных сечения: I – верхнее в начале обжатия ($h \sim 45$ мм над компактом), II – среднее в середине образца ($h \sim 25$ мм над компактом), III – нижнее в конце обжатия непосредственно над компактом ($h \sim 5$ мм над компактом). Толщина стенки образцов в среднем увеличилась в 2,5 раза, с 2 до 5 мм после обжатия.



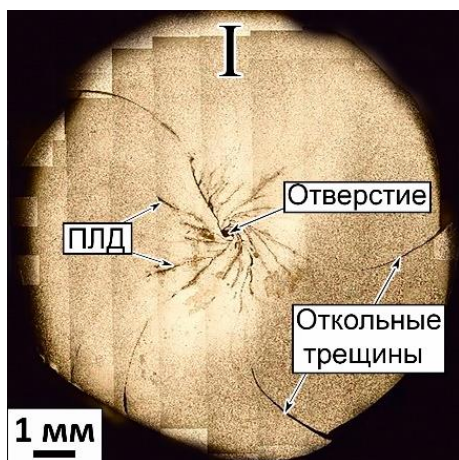
а)



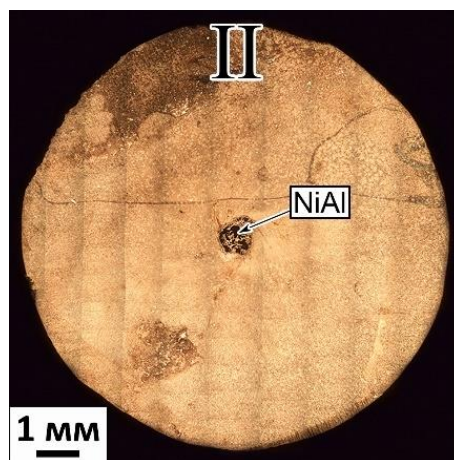
б)

Рисунок 10 – Общие виды образцов, обжатых в экспериментах (а) 1 и (б) 2. **I** – верхнее сечение в начале обжатия, **III** – нижнее сечение в конце обжатия

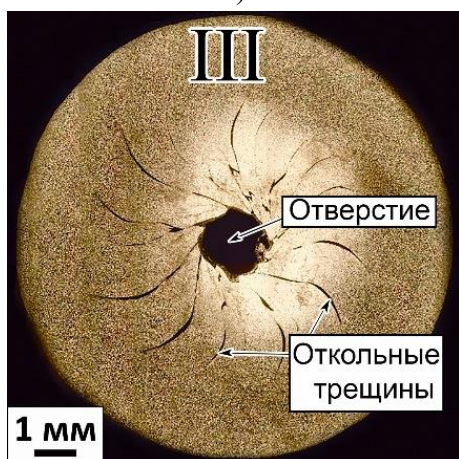
Рисунок 11а относится к случаю практически полного обжатия полого цилиндрического образца; диаметр отверстия уменьшился в 55,5 раза, с 10 до 0,18 мм. На изображении видны четыре основные трещины, изогнутые в одном направлении. Их кривизна свидетельствует о возникновении сдвиговой деформации, вызванной скользящими детонационными волнами. Сечение на рисунке 11в демонстрирует влияние преграды, помещенной в полость образца, которая препятствует процессу полной сходимости образца при обжатии последней скользящей детонацией; диаметр отверстия уменьшился в 5,5 раза (до 1,8 мм). Процесс схождения стенок цилиндра в нижней части также характеризовался сдвиговой деформацией, наблюдались многочисленные изогнутые откольные трещины.



а)



б)

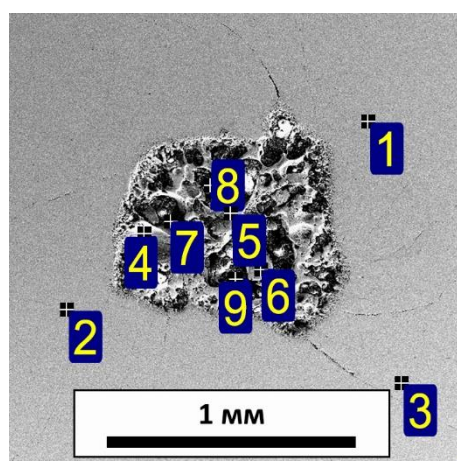


в)

Рисунок 11 – Оптические изображения поперечных шлифов 1-ого образца: а) – относится к **I** сечению, б) – к **II** сечению, в) – к **III** сечению

С точки зрения теории потери динамической устойчивости оболочек, процесс обжатия полого цилиндра скользящей детонационной волной сопровождается возникновением складкообразования на внутренней поверхности. При достижении критического уровня нагружения цилиндрическая оболочка теряет устойчивость, что приводит к формированию периодических выступов (складок). В зонах между соседними складками реализуется повышенная концентрация растягивающих напряжений, инициирующая зарождение радиальных откольных трещин. Эти трещины, распространяясь вглубь материала, по мере снижения амплитуды растягивающих напряжений трансформируются в ПЛД, что свидетельствует о переходе от хрупкого откольного разрушения к пластическому течению. На рисунке 11 видно, как от центральной полости отходят трещины, перерождающиеся в ПЛД. Внутри полости фиксируется сильно деформированный материал. Откольные трещины выходят на свободную поверхность цилиндра (рис. 11а), демонстрируя растяжение материала в результате деформации. Наряду с крупными трещинами наблюдаются более мелкие трещины и ПЛД. Максимальная деформация сдвига возникает на внутренней поверхности цилиндрического образца 1, поэтому ПЛД имеют тенденцию зарождаться именно там. На рисунке 11б обнаружены следы интерметаллидов NiAl в центральной полости. Несмотря на то, что сечение удалено на расстояние 25 мм от спрессованного компакта смеси Ni-Al и процесс схождения стенок цилиндра происходит до того, как сжатие дойдет до преграды в виде компакта.

На рисунке 12 приведен анализ состава продуктов, обнаруженных в месте центральной полости образца, размер которой не превышает 0,5 мм. Энергодисперсионный (ЭДА) и рентгенофазовый (РФА) анализы подтверждают наличие следов интерметаллидов NiAl.



№	Al	Ti	Cr	Fe	Ni
1	1,5	1,4	18,6	68,4	10,1
2	1,4	1,2	19,6	68,4	9,4
3	1,6	1,2	18,0	68,9	10,3
4	13,9	1,6	8,2	66,9	9,4
5	1,1	0,4	18,4	70,7	9,4
6	33,5	0,8	5,7	19,6	40,4
7	35,4	0,6	21,4	39,4	3,2
8	57,6	0,1	17,0	24,4	0,9
9	50,0	0,2	12,0	25,6	12,2

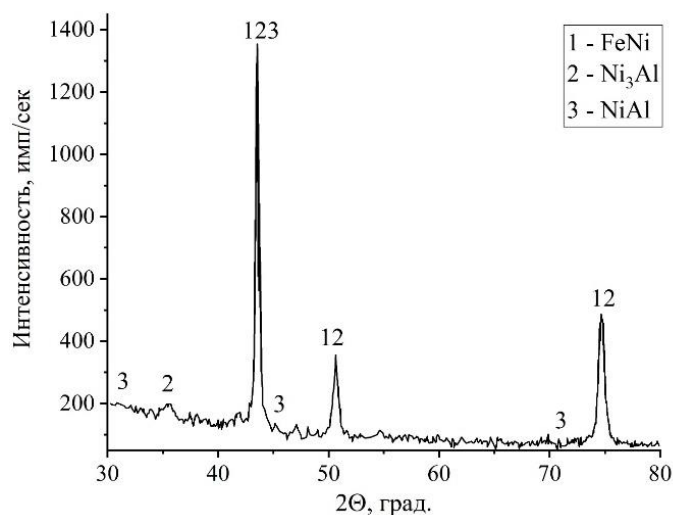


Рисунок 12 – ЭДА и РФА осевой области II сечения образца 1 (в ат. %)

На рисунке 13 показано, что в образце 2 происходит почти полное схлопывание отверстий, на верхней и нижней поверхностях, по сравнению с образцом 1, отсутствуют откольные трещины. На сечении I видны только микротрещины в середине и небольшая полость размером 0,2 мм, оставшаяся после полного схождения стенок цилиндра (рис. 13а). На сечении II присутствует отверстие размером менее 0,3 мм вместе с небольшим количеством микротрещин, также имеющих тенденцию к закручиванию (рис. 13б). На сечении III наблюдается отверстие размером около 1 мм: оно уменьшилось в 10 раз, с 10 до 1 мм (рис. 13в). В образце 2 не было зафиксировано остатков NiAl, что свидетельствует о его полном выходе в результате нагружения. Закручивание микротрещин и остаточной полости в образце 2 (рис. 13б) обусловлено действием сдвиговых компонент напряжений, возникающих при распространении скользящей детонационной волны вдоль оси цилиндра. В процессе схлопывания оболочки формируется не только радиальное, но и тангенциальное смещение материала, что приводит к спиралевидной траектории движения стенок и, как следствие, к закручиванию как оставшихся полостей, так и образующихся микротрещин.

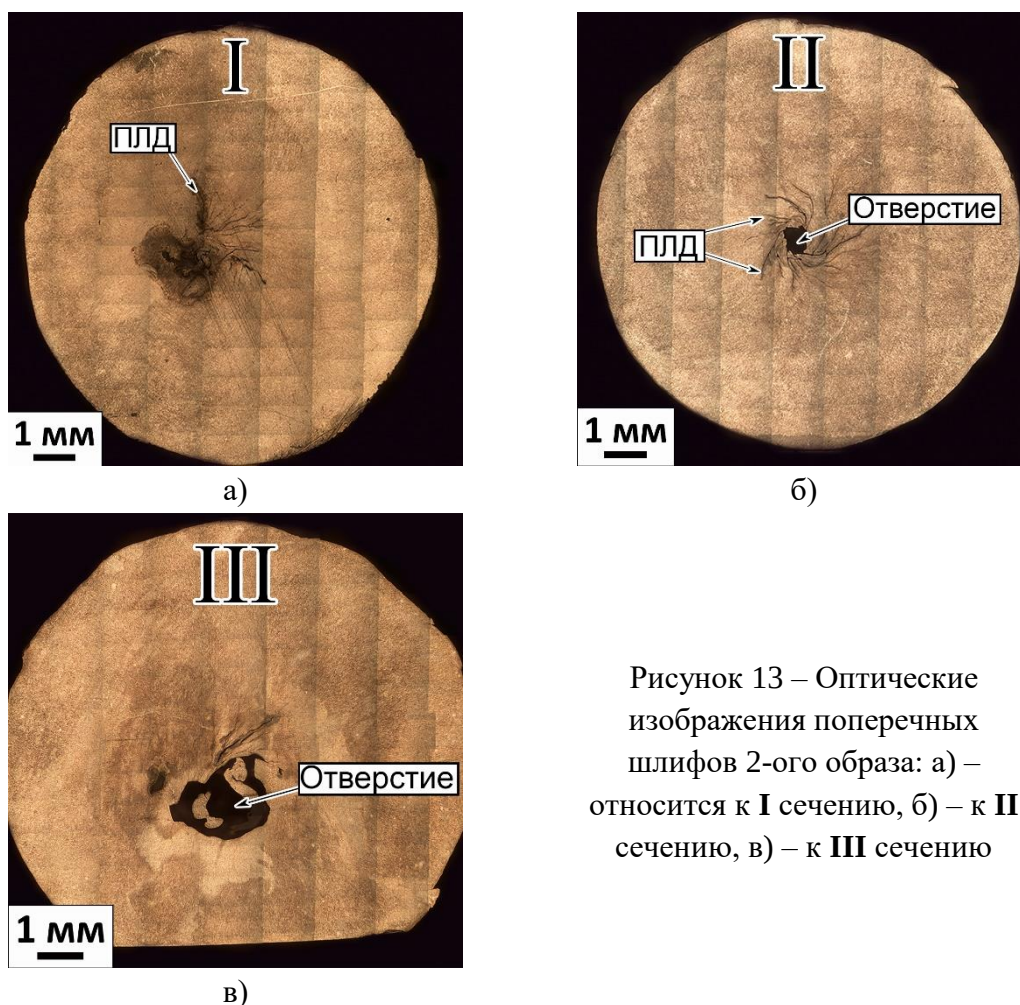


Рисунок 13 – Оптические изображения поперечных шлифов 2-ого образца: а) – относится к I сечению, б) – к II сечению, в) – к III сечению

На поперечных сечениях I и III обоих образцов была измерена микротвердость вдоль одной прямой линии по диаметру. У образца 1, обжатого без песчаной подушки, микротвердость на верхнем сечении преимущественно имеет большие значения по сравнению с нижним сечением, что связано с инициированием детонации в верхней части и распространением ударной волны сверху вниз с высокими параметрами (давление 3,5 ГПа, скорость 3750 м/с), при которых верхняя часть цилиндра испытывает максимальное воздействие. В образце 2, помещенном в слой песка, наблюдалась обратная картина: микротвердость выше в нижнем сечении, что обусловлено увеличением длительности импульсного нагружения, снижением параметров ударной волны (давление 1,9 ГПа, скорость 3150 м/с) и усилением роли преграды (компакт Ni-Al) в нижней части,

где взаимодействие сходящихся стенок с компактом создает дополнительную зону интенсивной деформации. При этом средняя микротвердость в обоих образцах одинакова и увеличивается на 25-30 % (до 400-420 HV) после нагружения, относительно исходной (320 HV). Максимальные значения (до 550 HV) фиксируются в зонах, прилегающих к откольным трещинам.

Таким образом, установлено, что увеличение длительности импульсного нагружения (на 10 %) за счет помещения экспериментальной сборки в слой песка приводит к значительному снижению повреждаемости материала. Показано, что в образце № 2 с увеличенной длительностью нагружения наружная поверхность сохраняет целостность, а количество радиальных откольных трещин в околоосевой области сокращается. Обнаружено, что даже при снижении импульсного воздействия в данных условиях не происходит полного обжатия цилиндра в сечениях вблизи компакта: сохраняются отверстия уменьшенного диаметра.

Проведенные исследования позволяют выявить общие закономерности и принципиальные различия в поведении алюминиевых бронз и коррозионно-стойкой стали при ударно-волновом нагружении. Для всех материалов определяющим фактором образования откольных трещин является наличие свободных поверхностей, обеспечивающих формирование волн разгрузки и зон растягивающих напряжений. При этом характер разрушения (осевой, кольцевой, радиальный) определяется геометрией образца и схемой нагружения: метание пластины-ударника по сплошному цилиндру инициирует осевые откольные трещины, а при наличии центрального отверстия приводит к образованию кольцевых трещин, локализованных посередине толщины стенки; обжатие скользящей детонационной волной полых цилиндров, напротив, вызывает радиальные откольные трещины, зарождающиеся между складками на внутренней поверхности.

Степень деформационного упрочнения и склонность к залечиванию дефектов зависят от исходного структурного состояния материалов: бронзы, полученные горячей деформацией (БрАЖ9-4), имеют большой ресурс упрочнения, а предварительно наклепанные (БрАМц9-2) демонстрируют более высокую чувствительность к изменению параметров нагружения. Сталь 08Х18Н10Т, благодаря аустенитной структуре и возможности мартенситного превращения, способна выдерживать более интенсивные нагрузки без магистрального разрушения при условии достаточной длительности импульса. Полученные результаты открывают возможности для целенаправленного выбора режимов ударно-волновой обработки с целью либо моделирования откольного разрушения для исследовательских задач, либо его подавления и даже частичного залечивания при повторном нагружении, что особенно перспективно для продления ресурса ответственных деталей.

Основные результаты и выводы по работе

1. На основе теоретического анализа волновых картин при соударении и обжатии установлены закономерности формирования откольных повреждений. Фокусировка боковых волн разгрузки на оси образца приводит к осевым трещинам, а интерференция волн от складок на внутренней поверхности – к радиальным трещинам и полосам локализованной деформации, что развивает теоретические представления о механизмах откольного разрушения при различных схемах нагружения и позволяет прогнозировать тип повреждаемости в зависимости от условий эксперимента.

2. Исследовано влияние геометрии свободных поверхностей, которое показало, что в сплошных цилиндрах при обжатии откольная повреждаемость отсутствует, а наличие центрального отверстия в образце приводит к образованию кольцевых трещин посередине толщины стенки, параллельных границам. В полых стальных цилиндрах с внутренней преградой потеря динамической устойчивости вызывает радиальные трещины между складками. Выявленные закономерности позволяют прогнозировать зоны разрушения в конструкциях

сложной формы и выбирать геометрию образцов, минимизирующую повреждения при динамическом нагружении.

3. Оценена степень деформационного упрочнения и установлено, что после метания пластины-ударника средняя микротвердость бронз БрАЖ9-4 и БрАМц9-2 возрастает до 296 HV (прирост 56 и 64 % соответственно), максимальные значения фиксируются в приповерхностной зоне (2-6 мм). При обжати скользящей детонационной волной упрочнение более равномерное: микротвердость БрАЖ9-4 – 253 HV (прирост 33 %), БрАМц9-2 – 264 HV (47 %). Для стали средний прирост после обжатия скользящей детонационной волной составляет 25-30 % (до 400-420 HV), а в зонах, прилегающих к откольным трещинам, достигает 550 HV. Полученные количественные данные позволяют прогнозировать изменение механических свойств изделий при импульсных нагрузках.

4. Выявлены закономерности изменения структуры и механических свойств в зависимости от метода нагружения. Показано, что характер разрушения определяется фазовым строением материалов: для бронз – наличием эвтектоидной составляющей (БрАЖ9-4) или пластичной α -матрицы (БрАМц9-2); для стали – аустенитной структурой, обеспечивающей высокую пластичность и сопротивление откольному разрушению при динамическом нагружении. Эти закономерности дают возможность целенаправленно выбирать режимы нагружения для достижения требуемого структурного состояния материалов.

5. Определено влияние длительности и повторного нагружения. Увеличение длительности импульса (на 10 %) при обжати стальных цилиндров существенно снижает повреждаемость: наружная поверхность сохраняет целостность, радиальные трещины отсутствуют. Впервые обнаружен эффект частичного заживления откольных дефектов в бронзах при повторном обжати, выражающийся в сокращении числа трещин, смыкании их берегов и росте микротвердости в зоне первичных трещин на 17-23 %. Эти результаты открывают перспективы для разработки технологий импульсной обработки, направленных на восстановление сплошности и продление ресурса ответственных деталей.

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК и входящие в базы данных Web of Science и Scopus:

1. Буравова, С.Н. Повреждаемость преграды при ударе удлиненным телом. / С.Н. Буравова, Е.В. Петров, М.И. Алымов, **В.О. Копытский** // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2022. – Т. 507. – С. 15-19. DOI: 10.31857/S2686740022060050; Buravova S.N. Material Damage to a Target Caused by an Impact with an Elongated Body. / S.N. Buravova, E.V. Petrov, M.I. Alymov, **V.O. Kopytskiy** // Doklady Physics. – 2022. – V. 67. – №. 11. – P. 447-450. DOI: 10.1134/S1028335822110027;
2. **Копытский, В.О.** Исследование откольной повреждаемости в бронзовых сплавах после ударно-волнового нагружения. / В.О. Копытский, Е.В. Петров, С.Н. Буравова // Известия ВолгГТУ – серия: Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – 2022. – Т. 11. – № 270. – С. 57-61. DOI: 10.35211/1990-5297-2022-11-270-57-61;
3. Буравова, С.Н. Особенности углового разрушения образцов из титана и стали после ударно-волнового нагружения. / С.Н. Буравова, А.Ф. Беликова, Н.И. Мухина, **В.О. Копытский**, Е.В. Петров // Известия ВолгГТУ – серия: Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – 2022. – Т. 11. – № 270. – С. 54-56. DOI: 10.35211/1990-5297-2022-11-270-54-56;
4. Buravova S. N. Specific features of target pulse destruction under impact by an elongated solid. / S.N. Buravova, E.V. Petrov, **V.O. Kopytskiy** // Letters on Materials. – 2023. – V. 13. – № 3. – P. 232-236. DOI: 10.22226/2410-3535-2023-3-232-236;

5. **Копытский, В.О.** Исследование влияния ударно-волнового нагружения на структуру и свойства бронзовых сплавов БрАЖ9-4 и БрАМц9-2. / В.О. Копытский, Е.В. Петров // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2023. – Т. 89. – № 6. – С. 35-41. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-6-35-41;
6. Буравова, С.Н. Повреждаемость цилиндрической оболочки в процессе ее инерционного схождения. / С.Н. Буравова, А.Ф. Беликова, Н.И. Мухина, **В.О. Копытский**, Е.В. Петров // Известия ВолгГТУ – серия: Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – 2023. – Т. 11. – № 282. – С. 47-51. DOI: 10.35211/1990-5297-20232-11-282-47-51;
7. Буравова, С.Н. Анализ процессов, сопровождающих цилиндрическую кумуляцию. / С.Н. Буравова, А.Ф. Беликова, Н.И. Мухина, **В.О. Копытский**, Е.В. Петров, М.И. Алымов // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2024. – Т. 515. – № 2. – С. 5-8. DOI: 10.31857/S2686740024020017.
8. **Копытский В.О.** Влияние параметров ударно-волнового нагружения на деформацию и повреждение полого стального цилиндра / В.О. Копытский, А.Ю. Малахов, И.В. Денисов, Е.В. Петров, Ф.Ф. Галиев, С.А. Серопян // Письма в Журнал технической физики. – 2026. – № 9. – С. 25-29. DOI: 10.61011/PJTF.2026.09.62704.20528;
Kopytskiy V.O. Influence of Shock-Wave Loading Parameters on Deformation and Damage of a Hollow Steel Cylinder. / V.O. Kopytskiy, A.Yu. Malakhov, I.V. Denisov, E.V. Petrov, F.F. Galiev, S.A. Seropyan // Technical Physics Letters. – 2026. – V. 52. – №. 5. – P. 22-25. DOI: 10.61011/TPL.2026.05.63286.20528;
9. **Kopytskiy V.O.** The effect of repeated shock-wave loading on the structure and properties of bronze alloys BrAZ9-4 and BrAmts9-2. / V.O. Kopytskiy, E.V. Petrov, O.D. Boyarchenko // Journal of Advanced Materials and Technologies. – 2026. – Vol. 11. – No. 3. – P. 214-224. DOI: 10.17277/jamt-2026-11-03-214-224.