

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Серопяна Степана Арутюновича «Исследование реакционных материалов систем $(\text{Ni-Al})-(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ и $(\text{W}-(\text{C}_2\text{F}_4)_n)\text{-Al}$: особенности упрочнения, воспламенения, горения и ударно-волнового инициирования», представленную к защите на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Актуальность темы. Реакционные материалы, совмещающие высокие энергетические и конструкционные свойства, являются одним из приоритетных направлений развития современных энергетических материалов. Замена традиционных инертных материалов (сталь, алюминий) в элементах боеприпасов и систем активной защиты на реакционные позволяет существенно усилить их эффективность за счёт выделения дополнительной тепловой энергии химической реакции. Однако ключевой проблемой, ограничивающей широкое применение таких материалов, остаётся их низкая механическая прочность, а также сложность контролируемого инициирования экзотермических реакций при высокоскоростном нагружении. В этой связи комплексные исследования, направленные на разработку способов упрочнения реакционных материалов на основе систем Ni-Al и $\text{W}-(\text{C}_2\text{F}_4)_n\text{-Al}$ при сохранении их реакционной способности, а также изучение механизмов ударно-волнового и теплового инициирования, являются безусловно актуальными как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Применение результатов исследования реакционных материалов для получения слоистых металло-интерметаллидных композитов, что открывает новые возможности для создания материалов с уникальным сочетанием твёрдости, жаропрочности и пластичности.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих результатов и выводов и списка использованных источников из 175 наименований. Общий объём работы составляет 132 страницы, включая 69 рисунков и 12 таблиц.

Содержание работы. Во введении обоснована актуальность, сформулированы цели, задачи, научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведён развернутый литературный обзор, в котором рассмотрены современные представления о реакционных материалах, методах их синтеза (СВС), компактирования и упрочнения. Отдельный интерес представляет анализ литературных данных по ударно-волновому

инициированию экзотермических реакций в гетерогенных системах. На основе обзора автором корректно сформулированы цель и задачи исследования.

Во **второй главе** представлены методики экспериментальных исследований. Следует отметить комплексный подход к исследованиям: реакционных и прочностных свойств материалов. Приведены описания установок для исследования параметров воспламенения, горения и ударно-волнового нагружения. Для установления структуры и состава полученных материалов использовались следующие методы анализа: РФА, СЭМ и ЭДС. Методики обработки экспериментальных данных соответствуют современному уровню.

В **третьей главе** приведены результаты исследования системы $(\text{Ni}-\text{Al})-(\text{C}_2\text{F}_4)_n$. Автором впервые показано, что комбинирование армирования вольфрамовыми волокнами и термической обработки позволяет повысить прочность на изгиб до 125 МПа. Подробно исследовано влияние добавок фторполимера на параметры горения и ударно-волновую инициируемость. Установлены концентрационные пороги инициирования при ударном нагружении, что является важным практическим результатом.

Четвертая глава посвящена исследованию высокоплотной системы $(\text{W}-(\text{C}_2\text{F}_4)_n)-\text{Al}$. Получены интересные данные о влиянии механической активации на снижение температуры воспламенения с 1000 до 660 °С и изменение механизма реакции. Автором показано, что в механоактивированных смесях инициирование идёт через твердофазное взаимодействие Al с W (образование Al_4W), а в неактивированных – через взаимодействие с продуктами разложения фторполимера.

В **пятой главе** представлены разработки по созданию металло-интерметаллидных композитов сталь/NiAl/сталь. Автором предложены две технологические схемы: одностадийная (сварка взрывом) и двухстадийная (сварка взрывом + термическая обработка). Проведены детальные исследования микроструктуры, фазового состава и микротвёрдости, показана возможность управления свойствами интерметаллидного слоя.

Научная новизна. Автором впервые установлен ряд закономерностей, имеющих существенное значение для химической физики горения и ударно-волновых процессов:

1. Впервые исследовано влияние содержания политетрафторэтилена $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ в системе Ni–Al на прочностные характеристики и параметры горения. Установлено, что добавление 1–5 мас.% $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ позволяет повысить относительную плотность образцов до 0,95–0,98 и увеличить прочность на

изгиб. Показано, что добавление $(C_2F_4)_n$ в систему Ni–Al позволяет варьировать скорость горения в широком диапазоне от 1,5 до 100 мм/с.

2. Впервые выявлен различный механизм инициирования в системе $(W-(C_2F_4)_n)-Al$ в зависимости от способа подготовки смеси: для механоактивированных составов – прямое твердофазное взаимодействие Al с W с образованием алюминидов, для смесей сухого смешивания – взаимодействие продуктов разложения $(C_2F_4)_n$ с Al и W с образованием фторидов и карбидов. Это является существенным вкладом в понимание химической физики процессов, протекающих в экстремальных условиях.

3. Впервые установлены концентрационные пределы (по содержанию Al) ударно-волнового инициирования для системы $(W-(C_2F_4)_n)-Al$ и показано их расширение при использовании наноразмерного W или механической активации.

4. Разработаны технологические схемы получения металло-интерметаллидных композитов с управляемым фазовым составом и микротвёрдостью, что является важным достижением в области создания слоистых композиционных материалов.

Практическая значимость. Результаты работы имеют непосредственное практическое применение. Разработанные реакционные материалы системы Ni–Al– $(C_2F_4)_n$, армированные вольфрамовыми волокнами (прочность до 125 МПа), могут быть использованы для изготовления функциональных оболочек устройств специального назначения. Материалы системы $(W-(C_2F_4)_n)-Al$ с высокой плотностью (до 6,4 г/см³) и температурой реакции до 2000 °С перспективны для применения в условиях, требующих сочетания высокой плотности и высокой реакционной способности. Разработанные одно- и двухстадийные схемы получения композитов сталь/NiAl/сталь позволяют создавать материалы с регулируемой микротвёрдостью (370–850 HV), что может найти применение в авиакосмической и специальной технике.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается комплексным применением взаимодополняющих аттестованных методик (РФА, СЭМ, ЭДС, измерения прочности и микротвёрдости), использованием современных физических методов исследования, воспроизводимостью экспериментальных данных, а также согласованностью полученных результатов с литературными данными и термодинамическими расчётами. Работа прошла широкую апробацию на международных и всероссийских конференциях.

Публикации и апробация. По теме диссертации опубликовано 24 печатные работы, в том числе 10 статей в реферируемых журналах из Перечня ВАК и баз Scopus/Web of Science, 14 тезисов докладов. Автореферат и публикации полностью отражают содержание диссертации.

Замечания по диссертационной работе.

Несмотря на высокий научный уровень работы, в ней имеется ряд замечаний, в основном касающихся глубины интерпретации ударно-волновых процессов и некоторых методических аспектов:

1. Отсутствие количественного анализа условий ударно-волнового инициирования. В работе приводятся значения скорости метания пластины (0,5; 1,0; 1,5 км/с), но не оценивается давление в ударной волне, возникающее в образце. Также не обсуждается длительность импульса нагружения, которая критически важна для протекания химических реакций (характерное время ~1 мкс). Для более глубокого понимания физики процесса следовало бы провести хотя бы оценочные расчёты параметров ударной волны в образцах (например, по ударным адиабатам компонентов) или указать причину, по которой такие расчёты не проводились.

2. Недостаточная интерпретация влияния схемы нагружения. В разделе 4.4 автор отмечает, что состав с 5 мас. % Al инициируется в цилиндрической ампуле, но не инициируется в плоской. Однако автором не приводится физического объяснения этого эффекта. В работе не рассматривается влияние боковой разгрузки и времени удержания давления. Было бы целесообразно дополнить этот раздел анализом влияния схемы нагружения на кинетику химической реакции.

3. Неоднозначность в выводах по сплошности соединения. В пятой главе (стр. 103) автор указывает, что даже при использовании технологических отверстий для удаления газов полностью сплошного соединения между интерметаллидным слоем и стальными слоями получить не удалось. Однако в выводах по главе 5 указано, что разработанная схема «обеспечивает их сплошность соединения». Требуется пояснение: что понимается под «сплошностью» — полное отсутствие расслоений или их локальное, допустимое наличие?

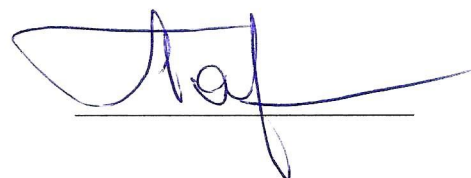
Указанные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Они касаются в основном более детальной интерпретации сложных процессов, происходящих при ударно-волновом нагружении, и не подвергают сомнению достоверность полученных экспериментальных данных и основные выводы. Диссертационная работа представляет собой завершённое научное

исследование, выполненное на высоком экспериментальном и теоретическом уровне.

Заключение. Диссертационная работа Серопяна Степана Арутюновича «Исследование реакционных материалов систем $(\text{Ni-Al})-(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ и $(\text{W}-(\text{C}_2\text{F}_4)_n)-\text{Al}$: особенности упрочнения, воспламенения, горения и ударно-волнового инициирования» является научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научно-техническая задача разработки многофункциональных реакционных материалов с высокими прочностными и энергетическими характеристиками, а также создания на их основе слоистых металло-интерметаллидных композитов с регулируемыми свойствами.

Таким образом, диссертация Серопяна Степана Арутюновича является научно-квалификационной работой, в которой изложены научно-технические решения, имеющие существенное значение для создания многофункциональных реакционных материалов и слоистых композитов. Работа выполнена в соответствии с требованиями п. 9 Положения о порядке присуждения учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Гаркушин Геннадий Валерьевич



Кандидат физико-математических наук

специальность 01.04.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Старший научный сотрудник лаборатории реологических свойств конденсированных сред при импульсных воздействиях Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии (ФИЦ ПХФ и МХ РАН)

142432, г. Черноголовка, проспект академика Семенова, д. 1,

Тел. +7 496 522-14-49, e-mail: garkushin@ficp.ac.ru

25 август 2026 г.

Я, Гаркушин Геннадий Валерьевич, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Подпись Гаркушина Г.В. уполномочен

Уполномоченный секретарь РМХ, ПХФ, МХ РАН



17.08.2026 Б.М.