

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ
ТОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ТНЦ СО РАН)

пр. Академический, 10/4, 634055, г. Томск, т/ф – (8-3822) – 491 173, т/ф – (8-3822) – 491-713, e-mail
prezid@hq.tsc.ru <http://www.tsc.ru>, ОКПО 34036713, ОГРН 1027000870863, ИНН/КПП 7021020064/701701001

«Утверждаю»

Директор ТНЦ СО РАН

Марков А.Б.

2026 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу 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 на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Актуальность выполненной работы

Реакционные материалы представляют собой перспективный класс композитов, которые при высокоскоростном нагружении или нагреве способны к экзотермическому превращению с выделением значительного количества тепловой энергии, что позволяет существенно усилить эффективность существующих защитных и поражающих устройств специального назначения. Современное развитие оборонной и специальной техники предъявляет повышенные требования к реакционным материалам. Помимо выделения тепловой энергии при внешнем воздействии они должны обладать и конструкционными свойствами для замены традиционных инертных материалов (алюминий, сталь).

Однако существующие реакционные материалы имеют принципиальный недостаток – высокие энергетические характеристики обычно достигаются за счёт снижения конструкционной прочности, что ограничивает их применение в изделиях, испытывающих значительные

нагрузки. Таким образом, задача создания реакционных материалов, сочетающих высокие прочность и энергетические характеристики, является актуальной как с фундаментальной, так и с практической точек зрения.

Также актуальной задачей является разработка технологических подходов к получению слоистых металло-интерметаллидных композитов на основе реакционных систем Ni–Al с использованием сварки взрывом и последующей термической обработки. Такие материалы, сочетающие высокую твёрдость интерметаллидных слоёв с пластичностью металлических, востребованы в авиакосмической и бронезащитной технике.

Проведённые исследования соответствуют приоритетным направлениям развития науки и техники, а работа выполнена при финансовой поддержке госзадания ИСМАН, программы Президиума РАН и РФФИ.

Содержание работы

Диссертация Серопяна С.А. объёмом 132 страницы состоит из введения, пяти глав, общих результатов и выводов и списка использованных источников из 175 наименований.

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цели и задачи, представлены научная новизна и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту. Введение написано лаконично и информативно, чётко определяет предметную область исследования.

Первая глава представляет собой литературный обзор, охватывающий классификацию реакционных материалов, основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), методы формования и упрочнения порошковых материалов, а также современное состояние исследований ударно-волнового инициирования экзотермических реакций. Особое внимание уделено анализу работ по слоистым металло-интерметаллидным композитам. Обзор свидетельствует о глубоком знании автором современной научной литературы по теме и позволяет обоснованно сформулировать цель и задачи исследования.

Во второй главе представлены методики экспериментальных исследований, включая термодинамические расчёты, методы изготовления образцов (холодное прессование, армирование волокнами, механическая активация), а также методы анализа (рентгенофазовый анализ, сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионный анализ, измерение прочности на изгиб, микротвёрдости и плотности). Описаны установки для исследования процессов воспламенения, горения и ударно-волнового нагружения. Использованные методики соответствуют современному уровню и позволяют получать воспроизводимые и достоверные результаты.

Третья глава посвящена разработке реакционных материалов на основе систем Ni–Al и (Ni–Al)–(C₂F₄)_n при варьировании содержания (C₂F₄)_n до

25 мас.%. Автором установлено, что добавление 1–10 мас.% $(C_2F_4)_n$ позволяет повысить относительную плотность образцов с 0,8 до 0,99. Показано, что комбинирование армирования непрерывными вольфрамовыми волокнами и термической обработки при 400 °С повышает прочность на изгиб до 125 МПа, что в 3 раза превышает прочность на изгиб неармированных аналогов. Исследованы параметры горения и установлено, что максимальная скорость горения (100 мм/с) достигается при содержании 1 мас.% $(C_2F_4)_n$. Определены концентрационные пороги ударно-волнового инициирования: при скорости метания 1,0 км/с требуется не менее 10 мас.% $(C_2F_4)_n$, при 1,5 км/с – не менее 5 мас.%.

Четвёртая глава содержит результаты исследования высокоплотной системы $(W-(C_2F_4)_n)-Al$. Показано, что механическая активация принципиально меняет механизм инициирования реакции: в механоактивированных смесях реакция обеспечивается твердофазным взаимодействием алюминия с вольфрамом с образованием алюминида вольфрама (Al_4W), тогда как в смесях сухого смешивания инициирование обеспечивается взаимодействием продуктов разложения $(C_2F_4)_n$ с алюминием и вольфрамом с образованием фторида алюминия и карбидов вольфрама. Механическая активация позволяет снизить температуру воспламенения с 1000 до 660 °С и реализовать самоподдерживающийся режим горения в составе с 5 мас. % Al, что недостижимо при сухом смешивании. Показано, что применение наноразмерного вольфрама или механической активации расширяет концентрационные пределы ударно-волнового инициирования, обеспечивая протекание реакции в составах с 5 и 30 мас.% Al.

Пятая глава посвящена разработке слоистых металло-интерметаллидных композитов сталь/NiAl/сталь. Автором разработаны две технологические схемы: одностадийная (ударно-волновое нагружение при 1,5 км/с), позволяющая синтезировать слой NiAl с микротвёрдостью до 670 HV, и двухстадийная (ударно-волновое нагружение при 0,5 км/с с последующей термической обработкой), обеспечивающая возможность регулирования фазового состава ($NiAl$, Ni_2Al_3 , $NiAl_3$) и микротвёрдости интерметаллидного слоя в диапазоне от 370 до 850 HV. Проведены детальные исследования микроструктуры и показано, что реакция в образце Ni–Al при ударно-волновом нагружении распространяется от конечного участка нагружения к начальному, а прекращение синтеза связано с теплоотводом.

Общие результаты и выводы содержат 8 основных положений, полностью соответствующих поставленным задачам и подтверждённых экспериментальными данными.

Научная новизна полученных результатов

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

1. Установлен комплексный эффект комбинирования армирования непрерывными вольфрамовыми волокнами и термической обработки, позволяющий повысить прочность на изгиб реакционных материалов системы $(\text{Ni-Al})-(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ в три раза (до 125 МПа) с сохранением реакционной способности.

2. Выявлены различия в механизмах инициирования в системе $(\text{W}-(\text{C}_2\text{F}_4)_n)-\text{Al}$ в зависимости от способа подготовки смеси: для механоактивированных составов – прямое твердофазное взаимодействие Al с W (образование Al_4W), для смесей сухого смешивания – взаимодействие продуктов разложения $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ с Al и W (образование AlF_3 , W_2C , WC). Это является существенным вкладом в понимание химической физики процессов, протекающих в экстремальных условиях высокоскоростного нагружения.

3. Установлены концентрационные пределы ударно-волнового инициирования для системы $(\text{W}-(\text{C}_2\text{F}_4)_n)-\text{Al}$ и показано их расширение при использовании наноразмерного W или механической активации, обеспечивающее протекание экзотермической реакции в составах с 5 и 30 мас.% Al.

4. Разработаны одностадийная и двухстадийная технологические схемы получения слоистых металло-интерметаллидных композитов сталь/NiAl/сталь с регулируемым фазовым составом и микротвёрдостью.

Теоретическая и практическая значимость результатов

Теоретическая значимость работы заключается в установлении закономерностей влияния состава, дисперсности компонентов, способа смешивания, армирования и термической обработки на комплекс свойств реакционных материалов, а также в выявлении механизмов инициирования экзотермических реакций при тепловом и ударно-волновом воздействии в системах $(\text{Ni-Al})-(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ и $(\text{W}-(\text{C}_2\text{F}_4)_n)-\text{Al}$.

Практическая значимость работы подтверждается следующим:

1. Разработан способ повышения прочности на изгиб до 125 МПа реакционных материалов системы $(\text{Ni-Al})-(\text{C}_2\text{F}_4)_n$, позволяющий использовать их в качестве функциональных оболочек устройств специального назначения взамен традиционных инертных материалов.

2. Определены области применения разработанных материалов: система $\text{Ni-Al-1\%}(\text{C}_2\text{F}_4)_n$, армированная вольфрамовыми волокнами, рекомендована для функциональных оболочек; материал состава $72\text{W-18}(\text{C}_2\text{F}_4)_n-10\text{Al}$ (плотность 6,4 г/см³, температура реакции до 2000 °C)

перспективен для устройств, требующих сочетания высокой плотности и высоких температур.

3. Разработаны технологические схемы получения слоистых металло-интерметаллидных композитов, позволяющие создавать материалы с управляемыми свойствами.

Степень обоснованности и достоверности научных положений

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- использованием комплекса современных взаимодополняющих физико-химических методов исследования (рентгенофазовый анализ, сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионный анализ, методы определения прочности на изгиб и микротвёрдости);
- проведением термодинамических расчётов с использованием программы «ИСМАН-THERMO»;
- воспроизводимостью экспериментальных данных и их согласованностью с результатами других авторов;
- широкой апробацией результатов на международных и всероссийских конференциях.

Научные положения, сформулированные в диссертации, обоснованы и подтверждены экспериментальными данными, соответствуют поставленным задачам.

Соответствие содержания диссертации паспорту научной специальности

Диссертационная работа Серопяна С.А. соответствует паспорту научной специальности 1.3.17 – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» (отрасль науки – технические) по следующим областям исследования:

- пункт 1 «Поведение веществ и структурно-фазовые переходы в экстремальных условиях ...» – исследованы закономерности ударно-волнового инициирования и структурно-фазовых превращений в реакционных материалах;
- пункт 4 «Закономерности и механизмы распространения, структура, параметры и устойчивость волн горения, детонации, взрывных и ударных волн; связь химической и физической природы веществ и систем с их термохимическими параметрами, характеристиками горения, взрывчатого превращения» – изучены параметры горения и ударно-волнового инициирования, установлены механизмы экзотермических превращений;
- пункт 5 «Взаимодействие волн горения и взрывчатого превращения со средой, объектами и веществами» – разработаны технологические схемы получения слоистых композитов с использованием сварки взрывом.

Соответствие автореферата содержанию диссертации

Автореферат в полной мере отражает основные положения диссертационной работы, содержит все ключевые результаты и выводы. Содержание автореферата соответствует структуре и содержанию диссертации, оформлено в соответствии с установленными требованиями.

Основные научные результаты достаточно полно опубликованы в рецензируемых научных изданиях, входящих в Перечень ВАК и базы данных Scopus и Web of Science, включая высокорейтинговые.

Замечания по диссертационной работе.

1. В главе 3 подробно исследовано влияние термической обработки на прочность и реакционную способность системы (Ni–Al). Однако для систем с политетрафторэтиленом $(W-(C_2F_4)_n)-Al$ и $(Ni-Al)-(C_2F_4)_n$ такие исследования не проводились. Автор не рассматривает возможность повышения прочности за счет термической обработки без существенной потери реакционной способности (до температуры разложения политетрафторэтилена, 415 °C), что, возможно, могло бы стать дополнительным инструментом управления свойствами этого класса материалов.

2. В работе отсутствует системный анализ влияния масштабного фактора на ударно-волновое инициирование. Исследуются образцы различных размеров (диаметром 3, 10, 20 и 58 мм). Однако автор не проводит сравнительного анализа влияния размера образца на критическую энергию инициирования. Остаётся неясным, в какой степени полученные пороги инициирования зависят от массы образца, теплотер в окружающую матрицу и влияния краевых эффектов. Проведение такой оценки позволило бы более корректно экстраполировать результаты на реальные изделия большего размера.

3. В работе отсутствуют оценки влияния атмосферы на процессы горения. В методике (глава 2) указано, что эксперименты по горению проводились в аргоне и на воздухе, однако в тексте не приводится сравнительного анализа результатов в разных атмосферах. Было бы интересно оценить, как наличие кислорода воздуха влияет на скорость горения, температуру и фазовый состав продуктов для исследованных систем.

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.

Заключение.

Диссертационная работа Серопяна Степана Арутюновича «Исследование реакционных материалов систем $(\text{Ni-Al})-(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ и $(\text{W-C}_2\text{F}_4)_n\text{-Al}$: особенности упрочнения, воспламенения, горения и ударно-волнового инициирования» является завершённой 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.

По актуальности, научной новизне, практической значимости и объёму полученных результатов диссертационная работа полностью соответствует требованиям пп. 9–11, 13, 14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Серопян Степан Арутюнович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.3.17. «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

Результаты диссертационной работы Серопяна С.А., а также отзыв на диссертацию и автореферат были доложены и обсуждены на научном семинаре Томского научного центра СО РАН, протокол № 9/1 от 03.09.2026 г.

Председатель семинара,
начальник научно-исследовательского отдела
структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН,
д.ф.-м.н.



О. В. Лапшин

Секретарь семинара, главный ученый секретарь
ТНЦ СО РАН, к.т.н.



О. В. Львов

03.09.2026 г.