

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

**доктора физико-математических наук А.Ю. Долгобородова
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**

Диссертационная работа Серопяна С.А. посвящена исследованию многофункциональных реакционных материалов на основе смесей твердых реагентов Ni, Al, фторопласта и W. Получены новые важные результаты по созданию высокопрочных реакционноспособных составов, особенностям их воспламенения, горения и ударно-волнового инициирования, также разработан способ создания слоистых металл-интерметаллидных композитов с использованием сварки взрывом и термической обработки.

Актуальность работы определяется необходимостью создания новых реакционных материалов, имеющих как конструкционную прочность, так и высокую реакционную способность при ударно-волновом воздействии. Такие материалы позволяют получать дополнительное энерговыделение при ударно-волновом нагружении при использовании в составе поражающих элементов, кумулятивных зарядов или систем активной защиты. Особый интерес представляют системы $(\text{Ni-Al})-(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ и $(\text{W}-(\text{C}_2\text{F}_4)_n)\text{-Al}$, обладающие как высокой плотностью, так и способностью к значительному энерговыделению при ударно-волновых воздействиях, что делает их перспективными для замены традиционных инертных материалов. Разработка методов повышения прочности таких материалов при сохранении их реакционной способности, а также создание на их основе слоистых металл-интерметаллидных композитов является важной научной и практической задачей.

Целью работы являлось исследование металл-полимерных реакционных материалов с высокими прочностными и энергетическими характеристиками, а также создание на основе реакционных материалов металл-интерметаллидного слоистого композита. Для достижения цели решались задачи по изучению влияния способов повышения прочностных

характеристик на параметры горения порошковых систем $(\text{Ni-Al})-(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ и $(\text{W}-(\text{C}_2\text{F}_4)_n)\text{-Al}$, исследованию влияния механической активации на параметры горения, воспламенения и ударно-волнового инициирования, а также по разработке схем и режимов ударно-волнового нагружения для создания металл-интерметаллидного слоистого композита.

Таким образом можно сделать вывод, что диссертационная работа Серопяна С.А., посвященная исследованию реакционных материалов систем $(\text{Ni-Al})-(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ и $(\text{W}-(\text{C}_2\text{F}_4)_n)\text{-Al}$, включая особенности их упрочнения, воспламенения, горения и ударно-волнового инициирования, а также разработке на их основе слоистых металл-интерметаллидных композитов, актуальна и имеет как научное, так и практическое значение.

Актуальность работы подтверждается также тем, что она выполнена при поддержке программы Президиума РАН I.56, проекта РФФИ № 20-08-00640-А, государственного задания ИСМАН, КП № 22.

Диссертация общим объемом 132 страницы состоит из введения, 5-и глав и заключения, содержащего основные результаты и выводы. Библиография содержит 175 наименований.

Во **введении** обоснованы актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость диссертации, приведены выносимые на защиту положения.

В **первой главе** приведен литературный обзор по различным реакционным материалам, приведены некоторые данные по самораспространяющемуся высокотемпературному синтезу (СВС), описаны методы формования и упрочнения порошковых материалов, особенности ударно-волнового нагружения реакционных материалов, а также современное состояние исследований в области слоистых металл-интерметаллидных композитов. На основе проведенного литературного анализа автором сформулированы цель и задачи исследования.

Во **второй главе** приведены характеристики используемых материалов, описаны методики подготовки смесей и изготовления образцов, приведены описания установок для исследования параметров воспламенения, горения и ударно-волнового нагружения, а также методы анализа структуры и свойств полученных материалов (рентгенофазовый анализ, сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионный

анализ, методики измерения микротвердости и прочности на изгиб). Методическое обеспечение экспериментальных исследований соответствуют современному уровню и позволяют получить достоверные результаты.

В третьей главе приведены результаты разработки реакционных материалов на основе систем Ni–Al и (Ni–Al)–(C₂F₄)_n. Автором показано, что добавление 1–5 масс. % (C₂F₄)_n в систему Ni–Al позволяет повысить относительную плотность образцов с 0,8 до 0,98, что способствует росту прочности. Впервые установлено, что комбинирование армирования непрерывными вольфрамовыми волокнами и термической обработки при 400 °С позволяет повысить прочность на изгиб до 125 МПа, что в 3 раза превышает прочность неармированных аналогов. Исследованы параметры горения и ударно-волнового инициирования системы (Ni–Al)–(C₂F₄)_n. Показано, что максимальная скорость горения системы (Ni–Al)–(C₂F₄)_n достигается при содержании 1 масс. % (C₂F₄)_n. С ростом содержания (C₂F₄)_n повышается чувствительность к ударно-волновому импульсу.

В четвертой главе представлены результаты исследования высокоплотной системы (W–(C₂F₄)_n)–Al. Автором показано, что механическая активация позволяет снизить температуру воспламенения с 1000 до 660 °С и реализовать самоподдерживающийся режим горения в составе с 5 масс. % Al, что недостижимо при сухом смешивании. Впервые установлено, что механическая активация принципиально меняет механизм инициирования реакции: в механоактивированных смесях реакция обеспечивается твердофазным взаимодействием Al и W с образованием Al₄W, тогда как в смесях, приготовленных сухим смешиванием, инициирование обеспечивается взаимодействием продуктов разложения (C₂F₄)_n с Al и W с образованием AlF₃ и карбидов вольфрама (W₂C, WC). Показано, что применение наноразмерного W или механической активации расширяет концентрационные пределы ударно-волнового инициирования, обеспечивая протекание экзотермической реакции в составах с 5 и 30 масс. % Al. Установлено, что характер нагружения критически влияет на ударно-волновое инициирование: переход от плоской геометрии к цилиндрической снижает порог инициирования.

В пятой главе изложены результаты разработки схем и режимов ударно-волнового нагружения для создания металл-интерметаллидных

слоистых композиционных материалов системы (МИСКМ) сталь/NiAl/сталь. Автором разработаны две технологические схемы получения МИСКМ: одностадийная (ударно-волновое нагружение при 1,5 км/с), позволяющая синтезировать слой NiAl с микротвердостью до 670 HV, и двух стадийная (ударно-волновое нагружение при 0,5 км/с с последующей термической обработкой), обеспечивающая формирование сплошного металлургического соединения и возможность регулирования фазового состава и микротвердости интерметаллидного слоя в диапазоне от 370 до 850 HV. Исследованы микроструктура и фазовый состав полученных композитов, показано, что реакция в образце Ni–Al при ударно-волновом нагружении распространяется от конечного участка к начальному, а прекращение синтеза связано с теплоотводом от образца.

В конце диссертации приведены основные результаты и выводы по работе.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне. **Достоверность полученных результатов** подтверждается их воспроизводимостью, использованием современного научно-лабораторного оборудования и аттестованных методик исследований, значительным количеством экспериментальных данных, а также сопоставлением полученных результатов с результатами других отечественных и зарубежных авторов.

Результаты работы получили свое отражение в достаточном количестве публикаций: по теме диссертации опубликовано 24 печатных работы, в том числе 10 статей в реферируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК и базы данных Web of Science и Scopus. Основные результаты докладывались на 14 международных и всероссийских конференциях, что свидетельствует о достаточной апробации работы. Результаты, полученные в работе, являются новыми, интересными и имеют важное научное и прикладное значение. Основные выводы по работе обоснованы.

По тексту диссертации есть ряд замечаний:

1. Литературный обзор по реакционным материалам недостаточно полон. Впервые возможность быстрой реакции фторопласта с алюминием была показана еще советскими исследователями в конце 1980-х (Стыров, Селиванов, Хмельников). При высокоскоростном соударении

фторопластового ударника с алюминиевой мишенью со скоростями более 600 м/с было получено существенное увеличение объема каверны по сравнению с инертными ударниками. Таким образом была показана возможность достаточно глубокого протекания химической реакции фторопласта с алюминием за времена порядка нескольких микросекунд. В дальнейшем в США начались масштабные исследования по созданию новых высокоплотных энергетических материалов, так называемых, реакционных материалов (Reactive Material - RM).

2. Недостаточная детализация методики и результатов механической активации. В главе 2 указано, что механическая активация проводилась в планетарной мельнице АГО-2 со стальными шарами. Использование стальных шаров для обработки порошков твердых частиц вольфрама, как правило приводит к намоту железа, однако данные об изменении фазового состава смесей в результате активации, а также о размерах и форме частиц после активации отсутствуют.
3. В главе 4 приведены результаты по продуктам реакции в системе вольфрам-фторопласт-алюминий. В частности, в выводах на стр. 84 указано: «В смесях, приготовленных сухим смешиванием, инициирование обеспечивается взаимодействием продуктов разложения $(C_2F_4)_n$ с алюминием и вольфрамом.» Среди продуктов указаны карбиды вольфрама и фторид алюминия W_2C , WC и AlF_3 , однако при этом также должен образоваться газообразный фторид вольфрама WF_6 . WF_6 является высокотоксичным газом, однако экологические аспекты в работе не рассмотрены.

Однако, указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей положительной оценки работы. Достоверность результатов работы и обоснованность выводов не вызывает сомнения.

Считаю, что диссертационная работа Серопяна Степана Арутюновича «Исследование реакционных материалов систем $(Ni-Al)-(C_2F_4)_n$ и $(W-(C_2F_4)_n)-Al$: особенности упрочнения, воспламенения, горения и ударно-волнового инициирования» соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе отвечает критериям пп. 9–11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (в действующей редакции), а ее автор, Серопян Степан

Арутюнович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Долгобородов Александр Юрьевич



Доктор физико-математических наук
специальность 01.04.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Зав. лабораторией ударно-волновых воздействий
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН)
125412. г. Москва, ул. Ижорская, д.13. стр.2
тел. 8(495)4832295, e-mail: aldol@ihed.ras.ru

7 сентября 2026 г.

Я, Долгобородов Александр Юрьевич, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись зав. лабораторией ударно-волновых воздействий ОИВТ РАН
д.ф.-м.н. А.Ю. Долгобородова

ЗАВЕРЯЮ

Ученый секретарь ОИВТ РАН

д.ф.-м.н.



А.Д. Киверин

7 сентября 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН)
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2
тел. 8(495)4844433, e-mail: alexeykiverin@gmail.com