

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию **Ананьева Сергея Юрьевича** «Физико-химические превращения углеродных наноструктур и реакционно-способных смесей при ударно-волновых воздействиях», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 — «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Актуальность темы диссертации

Углеродные нанотрубки привлекают большое внимание со стороны научного сообщества благодаря к их превосходным термическим, электронным и механическим свойствам как, например, перспективный упрочняющий материал для создания композитов, позволяющий значительно улучшать существующие характеристики традиционных керамических конструкционных материалов. Такие материалы могут обеспечивать экономический эффект за счет увеличения прочности и снижения износа. Поэтому большой интерес представляет исследование прочности и пределов структурной целостности самих нанотрубок при высоких давлениях, однако большая часть исследований в этой области выполнена с использованием техники высоких статических давлений.

Соединения Al-Ni обладают высоким для интерметаллидов тепловым эффектом образования, что делает возможным протекание реакции в смесях порошков Ni и Al в самоподдерживающемся режиме. Получению интерметаллидов NiAl и AlNi₃ в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) или теплового взрыва (ТВ), посвящено большое количество работ. Одно из возможных направлений получения компактных заготовок из NiAl – взрывное компактирование порошка интерметаллида с целью получения монолитных цилиндрических заготовок. Цилиндрические ампулы сохранения являются эффективным инструментом для нагружения порошковых материалов для получения новых материалов, в том числе и интерметаллидов. Однако эксперименты в ампулах сохранения не могут показать, когда произошла реакция — во время ударного нагружения или после него. Для более детального изучения этого процесса требуется проведение экспериментов, основанных на регистрации быстропротекающих процессов, происходящих в процессе ударного нагружения.

Распространение ударных волн в смесях твердых веществ сопровождается процессами, резко ускоряющими протекание химических реакций: разрушение исходной структуры компонентов, фазовые переходы, взаимное перемещение и перемешивание компонентов и продуктов реакции, сильный разогрев в местах контакта частиц, пластические деформации и деформации сдвига с освобождением свежих поверхностей и другие. В ходе ударного сжатия в реакционно-способных смесях могут протекать экзотермические реакции со значительным выделением энергии. Поиски условий, при которых возможно распространение ударно-индуцированных экзотермических реакций значительно активизировались в последнее время. Отчасти это связано с раз-

работкой, так называемых реакционных материалов для использования в различных видах вооружения, а также создания исполнительных устройств различного назначения. Исследования ведутся в рамках государственных программ и проектов, некоторые системы доведены до практического использования, а также активно проводятся исследования по оптимизации и разработке новых систем. В данной работе проведено исследование ряда термитных смесей на основе алюминия и твердых оксидов. Для увеличения реакционной способности смесей использован перспективный метод механохимической активации, что позволило повысить как скорости энерговыделения как в процессах горения, так и при импульсном инициировании, что, несомненно, актуально для разработки новых практически важных составов.

Новизна проведенных исследований и полученных результатов

Новизна проведенных исследований состоит в том, что впервые получены данные по пределам структурной устойчивости углеродных нанотрубок при динамическом нагружении, которые дополняют данные по пределам при статическом нагружении и вносят вклад в фундаментальные представления о физико-химических свойствах этого материала.

Впервые получены результаты по ударно-волновому инициированию и развитию реакции в механоактивированных термитных смесях. Определены оптимальные значения условий механической активации смесей порошков алюминия и никеля с микронными и наноразмерными частицами, а также алюминия и оксида меди.

Достоверность полученных результатов

Достоверность и обоснованность результатов и выводов работы подтверждается значительным количеством экспериментальных данных, полученных с использованием комплекса современных и хорошо апробированных методик анализа материалов, высокоточной аппаратуры и средств измерения параметров быстропротекающих процессов, а также адекватной постановкой задач и способов их решения.

Научная и практическая значимость

Полученные результаты расширяют представления о характере повреждений углеродных нанотрубок при динамических нагрузках. При использовании их в качестве армирующего материала при изготовлении керамики на основе карбида кремния установлено повышение пределов упругости и прочности на изгиб при статических воздействиях более чем вдвое по сравнению с чистой керамикой.

Продемонстрирована возможность получения интерметаллида NiAl при обжиге смеси NiAl в цилиндрических ампулах сохранения при давлении ударного сжатия свыше 10 ГПа. Получаемый материал может быть использован для изготовления различных деталей специального назначения.

Высокоэнергетические составы на основе смесей алюминия и оксидов металлов могут служить основой для получения реакционных материалов с высокими скоростями энерговыделения. В зависимости от состава, плотности и других физико-химических свойств реакционные материалы могут создавать

различные эффекты от повышения температуры и образования вторичных очагов возгорания до увеличения фугасного действия. Данные по свойствам механоактивированных смесей в зависимости от доз активации возможно использовать при разработке технологии получения реакционных материалов различного назначения.

Структура и содержание диссертационной работы

Во введении диссертационной работы обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели и задачи работы, представлены научная новизна и практическая значимость результатов, сформулированы защищаемые положения. В начале каждой главы приведен литературный обзор имеющегося научного задела по тематике главы.

В первой главе представлены новые экспериментальные данные по пределам структурной устойчивости одностенных и двустенных углеродных нанотрубок при ударно-волновом нагружении плоскими ударными волнами в ампулах сохранения. Изучена структура и механические свойства керамических композитов на основе SiC с добавлением углеродных нанотрубок, при статическом и ударно-волновом нагружении. Показано, что введение нанотрубок увеличивает прочность керамики при квазистатическом нагружении более, чем в два раза, тогда как при ударном сжатии композитных керамик их сопротивление динамическому разрушению не возрастает.

Во второй главе представлены результаты синтеза интерметаллида NiAl ударно-волновым нагружением в цилиндрических ампулах сохранения. Найдены условия взрывного нагружения ампул сохранения, при которых реакция Ni+Al протекает практически полностью с образованием интерметаллида NiAl с небольшим количеством Al₃Ni₅. Результаты исследования протекания реакции Ni+Al в микросекундном диапазоне не позволили оценить глубину протекания реакции, однако наблюдается отклонение данных в сторону более высоких массовых скоростей по сравнению с расчетами для нереагирующей смеси.

В третьей главе приведены результаты исследования нескольких реакционно-способных смесей различного состава. Измерена скорость разлета и динамика изменения площади области свечения при ударно-волновом нагружении. Определены составы, дающие наиболее яркое свечение и наибольшую длительность свечения. Подробно описана механоактивация смеси микронных и наноразмерных порошков алюминия и оксида меди в двух различных типах шаровых мельниц: вибрационной мельнице конструкции Аронова и планетарной «Активатор-2SL». По измерениям температуры воспламенения, яркостной температуре продуктов реакции установлена оптимальная доза активации для получения составов с наибольшей реакционной способностью. Описаны эксперименты по ударно-волновому и электроискровому инициированию смеси, измерена динамика и состав облака реагирующих продуктов смеси. Измерения проводимости в облаке и анализ продуктов показали наличие ионизированных газообразных продуктов, которые затем конденсируются в форме разнообразных частиц с размерами от нескольких нанометров до сотен микрометров.

Результаты диссертации имеют вполне достаточную публичную апробацию – опубликованы 7 печатных работ в изданиях, входящих в Перечень ВАК и индексируемые международными библиографическими базами WoS и Scopus, что соответствует требованию ВАК о количестве и качестве публикаций, необходимых для кандидатских диссертаций, а также доложены на известных Российских и международных конференциях.

Автореферат диссертации написан лаконично с четкой постановкой задач и ясным изложением полученных результатов.

Замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Следует отметить разнородность и слабую связанность результатов разных глав диссертации, хотя, безусловно, такая связь есть – все исследованные в диссертации процессы объединены, как минимум, высокоскоростным протеканием процессов, что и следовало обсудить во введении.

2. Считаю, что вывод об отсутствии принципиальных ограничений на размер получаемых образцов в методе получения интерметаллида NiAl в цилиндрических ампулах сохранения при давлении свыше 10 ГПа, не совсем верен, и было бы, как раз, очень полезно оценить пределы применимости метода по каким-то параметрам, важным с практической точки зрения.

3. В работе, на мой взгляд, не удалось достоверно определить условия протекания реакции Ni+Al при ударном сжатии состава в микросекундном диапазоне, хотя из литературы известно, что такая возможность существует.

4. В диссертации есть некоторые стилистические ошибки и опiski, например все аббревиатуры разного вида углеродных нанотрубок в списке сокращений расшифрованы одинаково.

Указанные замечания не снижают ценность и значимость диссертационной работы Ананьева С.Ю.

Заключение

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.14 — «Теплофизика и теоретическая теплотехника» и удовлетворяет критериям, которым должна отвечать диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, в соответствии с п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Правительством РФ от 24 сентября 2013 г. № 842. На использованные в диссертации отдельные результаты других авторов, в том числе, полученные в результате совместных исследований, диссертантом в работе даны соответствующие ссылки. Личный вклад автора в диссертационную работу не вызывает сомнения. Диссертация Ананьева Сергея Юрьевича «Физико-химические превращения углеродных наноструктур и реакционно-способных смесей при ударно-волновых воздействиях» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне, и содержит новые результаты, которые вносят существенный вклад в развитие экспериментальных исследований процессов, протекающих в реакционно-способных смесях при импульсных воздействиях.

Считаю, что диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям,

предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор **Ананьев Сергей Юрьевич** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 — «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного Совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией реологических свойств
конденсированных сред при импульсных воздействиях
Отдела экстремальных состояний
ФГБУН «Институт проблем химической физики РАН»

Разоренов Сергей Владимирович

«30» ноября 2018 г.

Почтовый адрес:

142432 Московская обл., Ногинский р-он, г. Черноголовка, пр-т ак. Семенова,
1, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт
проблем химической физики РАН». Тел.: (496)522-13-64; E-mail:
razsv@icp.ac.ru

Подпись д.ф.м.н. профессора Разоренова С.В.
удостоверяю

Ученый секретарь ФГБУН «Институт проблем химической физики РАН»,
доктор химических наук **Психа Б.Л.**

