

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Кочеткова Романа Александровича

МЕХАНИЗМЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГОРЕНИЯ ГРАНУЛИРОВАННЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ТИТАНА В ПОТОКЕ ИНЕРТНОГО И АКТИВНОГО ГАЗОВ

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.17 - химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Диссертационная работа Кочеткова Р. А. посвящена изучению горения гранулированных смесей титана в потоке газа. Диссертация имеет объем 145 стр. машинописного текста, состоит из введения, пяти глав и заключения, включает 42 рис. и 11 табл. Список литературы содержит 79 наименований.

Грануляция - хорошо известный технический прием, который вносит изменения в структуру исходной смеси и повышает ее газопроницаемость. В диссертационной работе на примере смесей титана убедительно показано, что грануляция в определенных условиях приводит к серьезным изменениям механизма и скоростей горения и позволяет облегчить и сделать более управляемой СВС-технологию получения целевых конденсированных продуктов. Работа диссертанта вносит существенный вклад в понимание механизма и закономерностей горения гранулированных смесей титана в потоке газа, до него эти вопросы подробно не изучались. **Новизна** результатов исследования не вызывает сомнений. Развитие фундаментальных представлений о СВС-процессах и прочная связь теории СВС с технологией получения конденсированных продуктов определяют **актуальность** темы диссертационной работы.

В первой главе диссертации представлен литературный обзор, который дает достаточно полное представление о развитии и современном состоянии

исследований в области СВС. Должное внимание уделено исследованиям гранулированных смесей. Сделан обоснованный вывод о том, что в работах предшественников основное внимание было уделено анализу продуктов СВС, закономерности горения практически не изучались. Подробно излагается конвективно-кондуктивная модель горения смесей с плавящимися компонентами. Именно эта модель широко используется диссертантом при обсуждении и анализе результатов исследования. В конце главы формулируются цели и задачи исследования, выполненного в диссертационной работе.

Во второй главе диссертации рассмотрены исходные материалы, которые были выбраны для исследования, описаны процедура гранулирования, методики измерения свойств исходных смесей и продуктов синтеза, а также представлена экспериментальная установка, в которой проводились СВС. Установка позволяет сжигать цилиндрические столбики смеси при продуве газовым потоком, измерять расход и давление газа в процессе горения, а также получать видеозапись процесса горения, из анализа которой определялись характер горения и его скорость. Для изготовления гранул в качестве связующего использовался поливинилбутираль, измерены размеры и плотность гранул, а также насыпная плотность и газопроницаемость.

Результаты исследования изложены в следующих трех главах.

В третьей главе диссертации изучены закономерности горения и приведены результаты анализа фазового состава продуктов СВС для композиций $Ti+0.5C$ при отсутствии газового потока и в потоке инертного газа (аргона). Для сравнения изучены гранулированные и порошковые смеси, сухие и увлажненные водой. Показано, что грануляция заметно изменяет скорость горения и делает ее мало чувствительной к влиянию газифицирующихся примесей, в том числе, влаги. Наблюдаемые закономерности объяснены с позиций конвективно-кондуктивной модели горения.

В четвертой главе диссертации изучены закономерности и механизм горения, а также фазовый состав продуктов СВС для композиций $Ti+0.5C$ в

потоке азота при давлении не выше 2 атм. Опять сравнивались гранулированная и порошковая смеси, для выяснения деталей механизма проведены опыты, в которых верхняя и нижние полузаряды разделены сетчатой перегородкой, исключающей кондуктивную передачу тепла. Эта часть исследования представляет особый интерес, так как в ходе реакций азотирования образуется карбонитрил титана. Убедительно показано, что гранулирование вызывает значительный рост скорости горения и кардинально изменяет механизм горения. Вместо двухфронтной конфигурации волны горения, наблюдаемой в порошковой смеси (фронт карбонизации титана и следующий за ним фронт азотирования), в гранулированной смеси имеет место единый фронт, который контролируется реакцией газообразного азота с титаном на поверхности гранул. Последующее взаимодействие титана с углеродом и азотирование TiC происходит в объеме гранул. Вместе с тем, анализ продуктов синтеза показал, что степень азотирования не достигает величины, отвечающей образованию $TiC_{0.5}N_{0.5}$,

В пятой главе диссертации была проверена гипотеза о том, что достижению более высокой степени азотирования препятствует взаимодействие TiC , образующегося в ходе горения, с расплавом Ti . Чтобы исключить это взаимодействие, были приготовлены смеси $TiC+Ti$ нужного состава, которые сжигались в потоке азота. Показано значительное различие в механизме и скоростях горения порошковой и гранулированной смесей, а также в степени азотирования образующегося продукта. Для гранулированной смеси гипотеза подтвердилась, степень азотирования продукта, образующегося при горении данной смеси, оказалась выше, чем при горении смеси $Ti+0.5C$.

В заключении диссертации приводятся краткие выводы работы.

В целом, исследование, проведенное Р. А. Кочетковым, выгодно отличается строгостью научного подхода, умелым применением надежных современных методик анализа, глубиной и изобретательностью в выборе условий экспериментов, убедительно доказывающих особенности механизма

процессов горения. В этих обстоятельствах **достоверность** исследования не вызывает сомнений.

Диссертация написана ясно и четко, с использованием принятой терминологии, оформление диссертации замечаний не вызывает.

Содержание диссертации полностью отражено в публикациях автора, работа неоднократно докладывалась на различных семинарах и конференциях и хорошо известна научной общественности.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

По тексту диссертации имеются следующие **замечания**.

1. В каждом опыте в процессе горения регистрировались расход газов и давление на входе и выходе из реактора, а также проводилась видеосъемка. Я думаю, что было бы полезно дать в диссертации несколько примеров регистрации в полном объеме (например, в виде диаграмм давлений и расхода во времени вместе с траекторией фронта горения, полученных в конкретном опыте). Это позволило бы читателю составить собственное представление о динамике процесса горения, его стационарности и фазе догорания, и сопоставить полученное впечатление с выводами диссертанта. Очевидно, что весь этот материал анализировался диссертантом, хотя в тексте диссертации процесс горения представлен лишь значениями скорости горения и фотографиями свечения горящего образца. Единственный пример диаграммы расхода азота на выходе (рис. 4.7 на стр. 107) демонстрирует очень интересные изменения расхода азота с течением времени. Однако, для того, чтобы можно было проверить вывод о том, что большая часть подводимого азота потребляется (вывод, который делает диссертант, приводя этот график), следовало бы иметь весь набор диаграмм.

2. Было бы полезно, чтобы диссертант привел данные по воспроизводимости (погрешности) измерений скорости горения, которые у него, несомненно, имеются. Это же замечание относится к результатам химического анализа продуктов синтеза.

1. На стр. 97 в величинах плотности гранулированной смеси и гранул

3

3

опечатка, правильные значения 800 и 1700 кг/м³, а не 0.8 и 1.7 кг/м³, как написано в тексте.

2. Предположение, сделанное на стр. 99, о том, что не вся поверхность гранул обдувается горячим газом, и что в пористом слое существуют застойные зоны, не подтверждается существующими представлениями о фильтрационном течении газа в однородной пористой среде (см., например, книгу Г. И. Баренблат, В. М. Ентов, В. М. Рыжик «Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа», М., Наука, 1972).

3. В тексте на стр.41, где рассматриваются свойства поливинилбутираля, написано, что это вещество имеет «низкую температуру разложения - 160°C». На самом деле, согласно измерениям, проведенным в лаборатории горения гетерогенных конденсированных систем, ИХФ РАН (зав. лаб. А. Н. Пивкина), термостойкость поливинилбутираля гораздо выше, заметное разложение начинается при температуре около 300 С.

Приведенные замечания не меняют моей в целом высокой оценки диссертационной работы, которая является самостоятельным и законченным научным исследованием, выполнена на актуальную тему, содержит новые результаты, очень интересные как с научной, так и с практической точки зрения. Диссертация Р.А. Кочеткова является научно-квалификационной работой, которая соответствует пункту 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года. Диссертация вносит существенный вклад в развитие фундаментальных представлений о СВС-процессах. Считаю, что автор диссертации Кочетков Роман Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.17 - химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Официальный оппонент

Зав. лаб. ИХФ РАН

кандидат физ.-мат. наук

Ермолаев Борис Сергеевич



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской
академии наук (ИХФ РАН)

Подпись зав. лаб. ИХФ РАН

к.ф.-м.н. Ермолаева Б. С.

подтверждаю

Ученый секретарь



Институт химической физики им. Н.Н. Семенова

Российской академии наук (ИХФ РАН) к.х.н. Л.Н.

Стрекова